

INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - IFRS  
CAMPUS RESTINGA

Elton Nazare Silva de Brum

**Projeto de um analisador de parâmetros de  
componentes eletrônicos**

**Porto Alegre**

**2021**

Elton Nazare Silva de Brum

## **Projeto de um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)– *Campus* Restinga, como requisito parcial para obtenção de título de Tecnólogo(a) em Eletrônica Industrial.

Prof. Dr. Eng. Alexsandro Cristovão Bonatto  
Profa. Dra. Elizandra Martinazzi

Porto Alegre

2021

Elton Nazare Silva de Brum

## **Projeto de um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)– *Campus* Restinga, como requisito parcial para obtenção de título de Tecnólogo(a) em Eletrônica Industrial.

Trabalho aprovado. Porto Alegre, 9 de Agosto de 2021:

---

**Prof. Dr. Eng. Alexsandro Cristovão Bonatto**  
Orientador

---

**Profa. Dra. Elizandra Martinazzi**  
Coorientadora

---

**Profa. Dra. Sheila Santisi Travessa**  
Avaliadora - IFRS campus Restinga

---

**Prof. Dr. Fausto Kuhn Berenguer Barbosa**  
Avaliador - IFRS campus Restinga

Porto Alegre  
2021

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Quero agradecer à minha família pelo apoio.

Quero agradecer ao meu orientador Bonatto e a minha coorientadora Elizandra Martinazzi. Também aos outros e outras que foram meus professores e professoras ao longo dessa jornada do curso.

Agradeço de forma geral a todos que colaboraram para a realização desse trabalho, em especial ao colega e amigo de trabalho Sr. Mauro Fin.

Agradeço ao IFRS pelos ensino público e de qualidade.

Agradeço à UFRGS que é o local onde eu trabalho e pude realizar meus experimentos.

# RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos. O objetivo geral desse projeto é desenvolver um equipamento capaz de gerar as curvas características de corrente e tensão de componentes eletrônicos. Outro requisito é de ser de menor custo comparado aos equipamentos comerciais existentes. O equipamento também pode auxiliar técnicos e estudantes de eletrônica, pois é possível verificar o funcionamento dos componentes eletrônicos através das curvas características. Os componentes que podem ser testados e observados, no que se refere as suas características de funcionamento, com o equipamento deste trabalho são: diodos e transistor de junção bipolar. O equipamento desenvolvido é composto por duas fontes de geração de sinal, sendo denominadas neste trabalho de gerador de coletor e gerador de base. No gerador de coletor encontra-se uma fonte de corrente e um sistema de aquisição de leitura da tensão do componente a ser testado. As tensões medidas através do gerador de coletor geram a família de curvas características na tela do osciloscópio através da função  $XY$ . O gerador de base é utilizado para testar componentes de três terminais, como o transistor de junção bipolar, através dele são aplicados degraus de corrente de até  $30\text{ mA}$ . Foram feitos três tipos de teste com quatro transistores de junção bipolar sendo eles o BD139, BD140, BC546 e BC556. Todos os testes foram feitos utilizando os mesmos transistores, no primeiro teste mediu-se o ganho  $h_{fe}$ , no segundo foi montado um circuito em uma *protoboard* para medição das correntes e cálculos dos valores de  $h_{fe}$ . Por último, foram geradas as curvas características no equipamento e através das mesmas, feito o cálculo do  $h_{fe}$  e das incertezas. Com os resultados do ganho  $h_{fe}$  e das incertezas, foram comparados os resultados entre o teste da *protoboard* e do analisador de parâmetros, obtendo ganhos dentro de uma mesma faixa de ganho  $h_{fe}$  para os transistores BD139 e BD140. Para os transistores BC546 e BC556 obteve-se apenas algumas curvas dentro de uma mesma faixa de ganho  $h_{fe}$ . Nesse trabalho foi possível desenvolver um equipamento de menor custo, se comparado aos equipamentos comerciais existentes. Foram geradas a família de curvas características de semicondutores como diodos e transistores de junção bipolar, dessa forma possibilitando auxiliar técnicos em eletrônica no conserto de equipamentos e os estudantes no aprendizado de eletrônica básica.

**Palavras-chave:** analisador de parâmetros, curva característica, componente eletrônico, semicondutor.

# ABSTRACT

This work presents the development of an electronic component parameter analyzer. The general objective of this project is to develop equipment capable of generating the current and voltage characteristic curves of electronic components. Another requirement is that it has a lower cost compared to existing commercial equipment. The equipment can also help technicians and electronics students, as it is possible to verify the functioning of electronic components through characteristic curves. The components that can be tested and observed, regarding their operating characteristics, with the equipment in this work are: diodes and bipolar junction transistor. The equipment developed is composed of two sources of signal generation, being called in this work collector generator and base generator. In the collector generator there is a current source and an acquisition system for reading the voltage of the component to be tested. The voltages measured through the collector generator generate the family of characteristic curves on the oscilloscope screen using the  $XY$  function. The base generator is used to test three terminal components, such as the bipolar junction transistor, through which current steps of up to  $30\text{ mA}$  are applied. Three types of tests were performed with four bipolar junction transistors, BD139, BD140, BC546 and BC556. All tests were carried out using the same transistors, in the first test the gain  $h_{fe}$  was measured, in the second a circuit was assembled on a *protoboard* for measuring currents and calculating the values off  $h_{fe}$ . Finally, the characteristic curves were generated in the equipment and through them, the  $h_{fe}$  and uncertainties were calculated. With the results of the  $h_{fe}$  gain and the uncertainties, the results between the *protoboard* test and the parameter analyzer were compared, obtaining gains within the same  $h_{fe}$  gain range for the transistors BD139 and BD140. For the BC546 and BC556 transistors we obtained only some curves within the same  $h_{fe}$  gain range. In this work, it was possible to develop equipment with a lower cost, if compared to existing commercial equipment. The family of characteristic curves of semiconductors such as diodes and bipolar junction transistors were generated, thus enabling to help technicians in electronics repair equipment and students to learn basic electronics.

**Keywords:** parameter analyzer, characteristic curve, electronic component, semiconductor.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas características do componente BC546, onde é apresentada a tensão e a resposta da corrente em função dos níveis de corrente aplicados na base do transistor. Fonte: Adaptado de (DATASHEET, BC546). . . . .	13
Figura 2 – Junção PN. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011). . . . .	14
Figura 3 – Representação de átomos de silício e germânio, ambos com quatro elétrons na camada de valência. Fonte: Adaptado de (TIPLER, 2014). . . . .	17
Figura 4 – Do lado esquerdo (a), mostra a representação da dopagem do silício. No lado direito (b), a representação das bandas de valência, níveis doadores e banda de condução. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011) . . . . .	18
Figura 5 – Exemplo de curva I-V de um diodo semiconductor. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011). . . . .	19
Figura 6 – Exemplo de curva I-V de um transistor semiconductor com as regiões de operação. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011). Onde em vermelho está demonstrado a região de corte, em verde a região de saturação, de amarelo a região de ruptura e no retângulo azul a região ativa. . . . .	19
Figura 7 – Diagrama simplificado de ligações, feito no <i>LTspice</i> , da conexão de dois transistores no gerador de base (1), gerador de coletor (2) e aquisição de dados (3). Transistor NPN à esquerda e PNP na direita. Fonte: Elaborado pelo autor (2021). . . . .	21
Figura 8 – Tela do osciloscópio onde é demonstrado a família de curvas características do transistor de junção bipolar BD139, utilizando a função XY. Fonte: elaborado pelo autor (2021). . . . .	21
Figura 9 – Rastreadores de curvas Tektronix 370B. Fonte: Adaptada de (TEKTRONIX, 2021a) . . . . .	22
Figura 10 – Analisador de parâmetros Keysight B2901B. Fonte: Adaptada de (TECNOLOGIES, 2020) . . . . .	22
Figura 11 – Keithley 4200A-SCS Parameter Analyzer. Fonte: Adaptada de (KEITHLEY, 2021). . . . .	23
Figura 12 – Diagrama simplificado de ligações, feito no <i>LTspice</i> , da conexão de um transistor NPN no gerador de base (1), gerador de coletor (2) e aquisição de dados (3). Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	24
Figura 13 – Esquema eletrônico do circuito gerador de coletor. O circuito é capaz de gerar na saída tensão contínua pulsante com amplitude controlada por um transistor de potência BUW84. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	25

Figura 14 – Transformador, chave alavanca, potenciômetro, transistores na configuração <i>Darlington</i> , Transistores de potência. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	26
Figura 15 – (3) Chave alavanca de duas posições e dois pólos, (1) e (2) chaves seletoras rotativas de seis posições e um pólo, empregadas para selecionar qual RC e RE será conectado ao componente. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	26
Figura 16 – Chave RC, Chave IC <i>shunt</i> de corrente, amplificador operacional LM 741 utilizado para medir à tensão do resistor <i>shunt</i> , saídas: coletor, emissor, canais 1 e 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	27
Figura 17 – Esquema eletrônico do circuito gerador de base. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	28
Figura 18 – Regulador de Tensão LM 7815 e LM 7915. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	29
Figura 19 – Gerador de pulsos para o CI 4520 contador. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	29
Figura 20 – Contador digital CI 4520. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	30
Figura 21 – Conversor D/A 4 <i>bits</i> com amplificador operacional. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	31
Figura 22 – Amplificador Operacional na configuração inversor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	32
Figura 23 – Circuito que limita o numero máximo de Curvas. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	32
Figura 24 – Diagrama esquemático da fonte de corrente. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	33
Figura 25 – Diagrama esquemático do amplificador <i>push-pull</i> . Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	34
Figura 26 – Amplificador <i>push-pull</i> . Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	35
Figura 27 – Fluxograma dos procedimentos. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	37
Figura 28 – Circuito teste montado na <i>protoboard</i> , para determinação dos <i>h<sub>fe</sub></i> s nos transistores NPN a esquerda e PNP a direita. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	38
Figura 29 – Família de curvas características IC-Vce do transistor BD139. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	41
Figura 30 – Gerador de coletor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	42
Figura 31 – Gerador de base. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	43
Figura 32 – Família de curvas BC546. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	45
Figura 33 – Família de curvas BD140. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	46
Figura 34 – Família de curvas BC556. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	48

Figura 35 – Curva Zener 15V. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	51
Figura 36 – Curva diodo retificador 1n4007. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . .	51
Figura 37 – Curvas características do transistor BD140 sem resistor em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	52
Figura 38 – Transistor BD140 com um resistor de 10 $k\Omega$ em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	52
Figura 39 – Transistor BD140 com um resistor de 2,7 $k\Omega$ em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021). . . . .	53

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de valores entre Analisador de Parâmetros de Componentes Eletrônicos Comerciais. . . . .	15
Tabela 2 – Comparativo entre três analisadores de parâmetro . . . . .	23
Tabela 3 – Ganho medido dos transistores de junção bipolar, os valores $hfe_{mín}$ e $hfe_{máx}$ foram obtidos do <i>datasheet</i> . . . . .	38
Tabela 4 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BD139. . . . .	39
Tabela 5 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BC546. . . . .	39
Tabela 6 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BD140. . . . .	39
Tabela 7 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BC556. . . . .	39
Tabela 8 – Ganho $hfe$ do transistor BD139 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	43
Tabela 9 – Incertezas do ganho $hfe$ do transistor BD139 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	44
Tabela 10 – Ganho $hfe$ do transistor BC546 com tensão $V_{ce} = 6 V$ . . . . .	45
Tabela 11 – Incertezas do Ganho $hfe$ do transistor BC546 com tensão $V_{ce} = 6 V$ . . . . .	46
Tabela 12 – Ganho $hfe$ do transistor BD140 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	47
Tabela 13 – Incertezas do Ganho $hfe$ do transistor BD140 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	47
Tabela 14 – Ganho $hfe$ do transistor BC556 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	48
Tabela 15 – Incertezas do Ganho $hfe$ do transistor BC556 com tensão $V_{ce} = 2 V$ . . . . .	48
Tabela 16 – Comparação dos experimentos <i>protoboard</i> e analisador para o BD139 e BD140. . . . .	49
Tabela 17 – Comparação dos experimentos <i>protoboard</i> e analisador para o BC546 e BC556. . . . .	50
Tabela 18 – Corrente de base medida com multímetro na coluna da esquerda e na direita os valores esperados. . . . .	50
Tabela 19 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BD139. . . . .	59
Tabela 20 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BC546. . . . .	60
Tabela 21 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BD140. . . . .	61
Tabela 22 – Resultados da verificação do $hfe$ para o transistor BC556. . . . .	62
Tabela 23 – Lista de componentes do projeto: Pesquisa feita em 24/05/2021 . . . . .	63
Tabela 24 – Continuação Tabela 23 Lista de componentes do projeto . . . . .	64

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Contextualização	12
1.2	Análise de defeitos usando a curva I-V	13
1.3	Motivação	15
1.4	Objetivos	15
1.4.1	Objetivo Geral	15
1.4.2	Objetivos Específicos	15
1.5	Especificação do equipamento	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
2.1	Materiais Semicondutores	17
2.2	Dispositivos semicondutores	18
2.3	analisador de parâmetros	20
2.4	Modelos comerciais	21
2.4.1	Tektronix 370B	22
2.4.2	Keysight B2901B	22
2.4.3	Keithley 4200A-SCS	23
2.5	Comparativo entre equipamentos Comerciais	23
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b>	<b>24</b>
3.1	Visão geral do circuito	24
3.1.1	Módulo gerador de tensão de coletor	24
3.1.2	Módulo gerador de tensão de base	27
3.2	Detalhamento dos sub-circuitos	28
3.2.1	Reguladores de Tensão LM 7815 e LM 7915	28
3.2.2	Gerador de pulsos para o CI 4520 contador	28
3.2.3	Contador digital de degraus de base	29
3.2.4	Conversor D/A 4 bits com amplificador operacional	30
3.2.5	Amplificador inversor com operacional	31
3.2.6	Circuito que limita o número máximo de Curvas	31
3.2.7	Fonte de corrente	33
3.2.8	Amplificador <i>push-pull</i>	34
3.3	Procedimento para utilização do analisador	35
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1	Procedimento para determinar o <i>hfe</i>	37

4.1.1	Medição do <i>hfe</i> com multímetro digital . . . . .	37
4.1.2	Medição <i>hfe</i> com circuito auxiliar de polarização . . . . .	38
<b>4.2</b>	<b>Resultados do analisador de parâmetros de componentes eletrônicos</b>	<b>41</b>
4.2.1	Resultado do transistor de junção bipolar NPN: BC546 . . . . .	45
4.2.2	Resultado do transistor de junção bipolar PNP: BD140. . . . .	46
4.2.3	Resultado do transistor de junção bipolar PNP: BC556. . . . .	47
<b>4.3</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>4.4</b>	<b>Teste de componentes que tem dois terminais.</b> . . . . .	<b>50</b>
4.4.1	Resultados para medição de Diodo Zener de 10V . . . . .	50
4.4.2	Resultados para medição de Diodo retificador 1n4007 . . . . .	51
<b>4.5</b>	<b>Simulação de falha no transistor BD140</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Melhorias futuras</b> . . . . .	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE A – INCERTEZA DE <i>HFE</i></b> . . . . .	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE B – MEDIÇÃO <i>HFE</i> COM CIRCUITO AUXILIAR DE POLARIZAÇÃO</b> . . . . .	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE C – LISTA DE COMPONENTES DO PROJETO</b> . . . . .	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados uma breve introdução ao analisador de componentes eletrônicos, da curva característica, os objetivos gerais e específicos e as delimitações do projeto. Também será apresentado um comparativo entre alguns equipamentos comerciais existentes.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos é um instrumento utilizado para realizar a análise do funcionamento de componentes eletrônicos (TEKTRONIX, 2021a). A análise do funcionamento através da visualização da família de curvas características facilita o processo de manutenção de equipamentos eletrônicos, pois permite visualizar se o componente eletrônico apresenta algum defeito. Além disso, pode ser utilizado para auxiliar estudantes de cursos de eletrônica nas aulas práticas de laboratório, de modo a auxiliar no ensino-aprendizagem do funcionamento dos componentes eletrônicos básicos utilizados nas disciplinas.

Nem todos instrumentos de medição possibilitam a visualização das curvas características, como por exemplo os multímetros. Estes são instrumentos de medição que apresentam resultados através de um *display* numérico, não gerando a curva característica do componente, como por exemplo o modelo ET-1502 do fabricante Minipa (MINIPA, 2021). Além de não gerar a curva característica, os multímetros geralmente aplicam valores de tensão e corrente menores que na maioria dos circuitos onde o componente vai ser utilizado, pois a corrente máxima empregada pelo multímetro no teste da junção PN de diodos e transistores é geralmente 1 mA (MALVINO A.; BATES, 2011).

O comportamento de saída de componentes eletrônicos é demonstrado através de uma família de curvas características. A família de curvas características estão descritas nos *datasheets* dos componentes, como pode ser visualizado em (DATASHEET, BC546). A curva característica de um componente eletrônico é um gráfico que relaciona cada valor da tensão aplicada com a respectiva corrente elétrica (MALVINO A.; BATES, 2011).

Para visualizar as curvas características de componentes eletrônicos, precisa-se de um equipamento ou circuito que polarize o componente a ser testado (VOLPINI; MOTA; FERNANDES, 2008) e que faça a aquisição dos dados de corrente e tensão. Esses dados podem ser salvos para serem exibidos posteriormente ou o equipamento pode ter uma tela para a exibição. O analisador de parâmetros de componentes eletrônicos Tektronix modelo 370A (TEKTRONIX, 2021b) é um exemplo de equipamento com tela para exibição da

curva característica, e será apresentado num comparativo posteriormente.

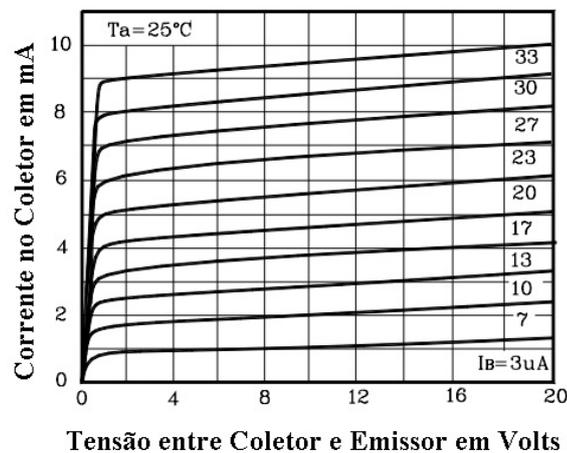


Figura 1 – Curvas características do componente BC546, onde é apresentada a tensão e a resposta da corrente em função dos níveis de corrente aplicados na base do transistor Fonte: Adaptado de ([DATASHEET, BC546](#)).

Na Figura 1 é apresentado um exemplo de uma família de curvas características do transistor BC546 ([DATASHEET, BC546](#)). Pode-se observar que no eixo horizontal é aplicada a tensão entre coletor e emissor, enquanto no eixo vertical percebe-se a corrente de coletor. Para gerar a família de curvas da Figura 1, foram aplicados na base do transistor degraus de corrente até um valor máximo de 33  $\mu A$ .

Para gerar e analisar as curvas características e observar o estado de funcionamento de alguns componentes eletrônicos, incluindo a verificação de defeitos, faz-se necessária a utilização de um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos. Buscou-se desenvolver neste trabalho de conclusão de curso um equipamento que fosse capaz de gerar tensões, para que o usuário pudesse visualizar o estado de funcionamento do componente através das curvas características geradas a partir da corrente e da tensão.

## 1.2 ANÁLISE DE DEFEITOS USANDO A CURVA I-V

Nesta seção, será tratada a análise de defeitos de curva de corrente *versus* tensão (I-V). Pode-se verificar o estado de funcionamento de um diodo e de um transistor de diferentes formas. Uma das formas é utilizar um multímetro digital, em que é possível fazer o teste de diodo ou o teste do ohmímetro. Alguns multímetros também têm um teste de ganho chamado *hfe* que serve para medir o ganho de transistores.

No multímetro é possível testar a junção PN, como visto na Figura 2, de diodos e transistores, polarizando essa junção de forma direta ou reversa, segundo ([MALVINO](#)

A.; BATES, 2011). Os multímetros digitais possuem fonte de corrente constante de  $1\text{ mA}$  para o teste de junção PN (MALVINO A.; BATES, 2011).

A junção PN de semicondutores como diodo e transistores pode ser medida da seguinte forma: (1) por polarização direta, conectando-se a ponta de prova vermelha no ânodo e a ponta de prova preta no cátodo; (2) por polarização reversa, fixando-se a ponta de prova vermelha no cátodo e a ponta de prova preta no ânodo.

O resultado da polarização direta para uma junção PN de silício resulta em um valor de tensão em torno de  $0,6\text{ V}$  e para germânio  $0,3\text{ V}$  (MALVINO A.; BATES, 2011). Já o resultado da medição reversa para ambos diodos em bom estado será tendendo ao infinito, indicando que estão em bom estado. Outra forma de medida é utilizando um analisador de parâmetros (BOYLESTAD ROBERT L.; NASHELSKY, 2013).

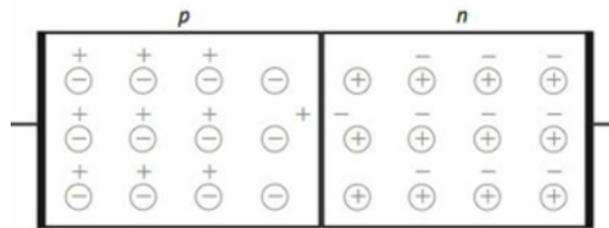


Figura 2 – Junção PN. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011).

Selecionando o teste do ohmímetro no multímetro digital, pode-se fazer o mesmo teste para diodo. De modo que, quando polarizada a junção PN reversamente, o multímetro deverá apresentar uma resistência muito elevada, na ordem de megaohms. O que indica que a junção PN não possui fuga para a corrente que o multímetro consegue aplicar. No caso em que a junção PN está polarizada diretamente, o multímetro vai demonstrar o valor da queda de tensão na junção (MALVINO A.; BATES, 2011).

Os multímetros geralmente têm baixa capacidade de corrente (MALVINO A.; BATES, 2011). Um transistor pode ter um ganho medido em um multímetro que tenha a medição de  $hfe$ . Entretanto, quando o mesmo transistor estiver em um circuito que utiliza uma corrente de base e coletor mais elevada, pode apresentar um  $hfe$  um pouco maior.

A tensão e corrente utilizadas pelo multímetro, algumas vezes são menores que as que foram projetadas para o transistor funcionar em um determinado circuito, dessa forma alguns defeitos podem passar despercebidos no teste do multímetro (MALVINO A.; BATES, 2011).

Um desses defeitos pode ser fuga de corrente, a qual é mais facilmente observado, quando utilizado um analisador de parâmetros de componentes eletrônicos. Outro defeito é a fuga de superfície causada pelas imperfeições na estrutura do cristal e também a fuga de corrente por polarização reversa (MALVINO A.; BATES, 2011).

## 1.3 MOTIVAÇÃO

Pelos motivos citados na Seção 1.2, buscou-se desenvolver um equipamento que, com o auxílio de um osciloscópio, pudesse fazer testes em componentes eletrônicos com tensões próximas do ponto de operação do componente, no circuito onde vai ser utilizado. Outro requisito é que o equipamento fosse leve, compacto e de menor custo em comparação aos comerciais, com valores apresentados na Tabela 1. Alguns equipamentos comerciais serão tratados no capítulo 2.

Tabela 1 – Comparativo de valores entre Analisador de Parâmetros de Componentes Eletrônicos Comerciais.

Equipamento de teste	Preço em R\$	Data da cotação
Tektronix Keithley 4200A-SCS	202.348,60	25/05/21
Tektronix 370A	130.684,66	25/05/21
Keysight Technologies B2901A	46.725,69	25/05/21

Fonte: O próprio autor (2021).

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um equipamento capaz de gerar a família de curvas características de corrente e tensão de componentes eletrônicos tais como: diodo retificador, diodo zener, transistores de junção bipolar dos tipos PNP e NPN. Podendo assim observar como seria o funcionamento destes componentes em um circuito real.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Desenvolver um equipamento de baixo custo, se comparado aos modelos comerciais;
- Gerar a curva característica de semicondutores, tais como diodo retificador, diodo zener, transistores de junção bipolar dos tipos PNP e NPN;
- Desenvolver um equipamento para poder auxiliar os técnicos de eletrônica no conserto de equipamentos,
- Desenvolver um equipamento para poder auxiliar estudantes no ensino-aprendizagem de semicondutores.

## 1.5 ESPECIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento deste projeto baseia-se em duas fontes geradoras de sinal. O painel está dividido em duas partes onde do lado esquerdo encontra-se a fonte gerador de coletor (GC) e no lado direito está a fonte gerador de base (GB).

A fonte gerador de coletor é composta por um transformador que fornece duas tensões selecionáveis sendo 80 V RMS com capacidade de corrente de 400 mA e 30 V RMS fornecendo 1 A, com a potência podendo chegar até 30 W.

O painel da fonte gerador de coletor têm os seguintes componentes:

- um potenciômetro para o ajuste de tensão;
- uma chave com duas posições para selecionar a faixa de tensão;
- outra chave para inverter a polaridade da fonte,
- uma chave seletora com seis resistores de diferentes valores, para limitar a corrente.

A segunda fonte, gerador de base, é composta por outro transformador que fornece 15 V com capacidade de corrente de 1 A, alimentando oito subcircuitos mais a carga. A corrente aplicada na carga, que é o componente a ser testado, é limitada através de um dos seis resistores que podem ser selecionados por uma chave seletora, fornecendo uma corrente máxima de 30 mA. A polaridade da fonte poderá ser invertida. A conexão do componente eletrônico a ser testado com o equipamento será através de condutores com garra jacaré nas extremidades. Os componentes a serem testados são:

- Diodos zener;
- Diodo retificador,
- Transistores de junção bipolar dos tipos PNP e NPN.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os componentes eletrônicos e seu funcionamento. Componentes esses que serão testados no analisador de parâmetros. Também será feita a explicação do funcionamento do equipamento.

### 2.1 MATERIAIS SEMICONDUTORES

Os dispositivos semicondutores utilizados na montagem de circuitos eletrônicos, são fabricados a partir de materiais cujas propriedades elétricas de condução de corrente elétrica estão entre um condutor e um isolante. Para fabricar um dispositivo semicondutor, são utilizados materiais com átomos contendo quatro elétrons na camada de valência, como esquematizado na Figura 3, tais como o silício e o germânio (BOYLESTAD ROBERT L.; NASHELSKY, 2013).

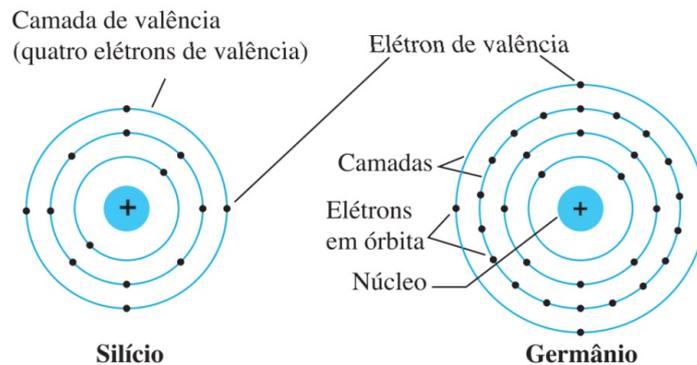


Figura 3 – Representação de átomos de silício e germânio, ambos com quatro elétrons na camada de valência. Fonte: Adaptado de (TIPLER, 2014).

Os materiais semicondutores utilizados na fabricação de componentes eletrônicos são classificados pela dopagem do cristal, podendo ser de dois tipos: intrínsecos e extrínsecos (MALVINO A.; BATES, 2011). O primeiro é fabricado com cristal puro e é capaz de transformar-se um isolante em temperatura ambiente. O segundo, fabricado com cristais dopados, pode assumir as características de um condutor ou isolante (MALVINO A.; BATES, 2011).

Semicondutor intrínseco é um cristal puro. Em temperatura ambiente este material é um isolante. No semicondutor extrínseco, o cristal é dopado como representado na Figura 4, para ficar com excesso de elétrons livres em relação ao número de lacunas e formar o semicondutor tipo N, ou pode ser dopado de uma forma a ficar com um número menor de

elétron livres em relação ao número de lacunas formando semicondutor tipo P (MALVINO A.; BATES, 2011).

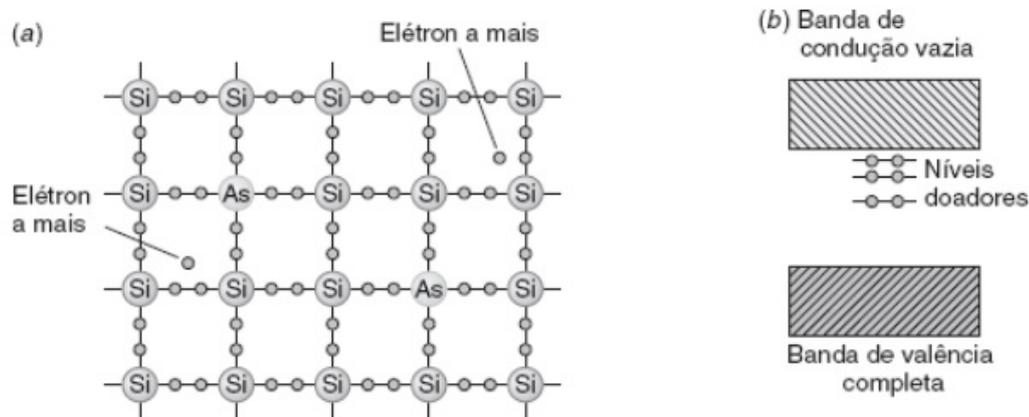


Figura 4 – Do lado esquerdo (a), mostra a representação da dopagem do silício. No lado direito (b), a representação das bandas de valência, níveis doadores e banda de condução. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011)

## 2.2 DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

Nos dispositivos semicondutores de dois terminais como os diodos, podemos identificar ao menos os parâmetros listados abaixo (MALVINO A.; BATES, 2011):

- **Tensão de Joelho ( $V_K$ )** : tensão na qual a corrente começa a aumentar rapidamente, na região direta de polarização;
- **Resistência de Corpo ( $R_B$ )**: resistência ôhmica das regiões P e N quando o diodo está polarizado diretamente, com tensão acima da tensão de joelho,
- **Tensão de Ruptura ( $V_Z$ )**: tensão máxima suportada pelo componente eletrônico, caso essa tensão seja ultrapassada, o componente eletrônico fica danificado permanentemente.

Segundo o modelo de terceira aproximação (MALVINO A.; BATES, 2011), tais parâmetros do diodo semicondutor são relacionados à tensão e à corrente do dispositivo usando a Equação 2.1.

$$V_D = V_K + I_D \times R_B \quad (2.1)$$

Onde  $V_D$  é a tensão do diodo,  $V_K$  é a tensão de queda do diodo,  $I_D$  é a corrente que circula no diodo e  $R_B$  é a resistência do diodo. Esta relação é válida quando o diodo encontra-se na região ativa de operação, ou de condução de corrente elétrica.

A Figura 5, apresenta a curva de corrente *versus* tensão de um diodo semiconductor com as especificações de parâmetros dada pela análise de terceira aproximação. A região ativa de operação encontra-se no primeiro quadrante do gráfico que está na Figura 5 (MALVINO A.; BATES, 2011).

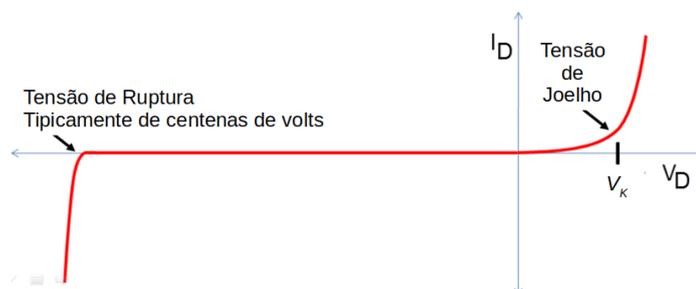


Figura 5 – Exemplo de curva I-V de um diodo semiconductor. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011).

Nos dispositivos semicondutores de três terminais como o transistor de junção bipolar, pode-se identificar quatro regiões de operação como mostrado na Figura 6, na qual,  $I_C$  é a corrente de coletor e  $V_{ce}$  representa a tensão entre coletor e emissor.

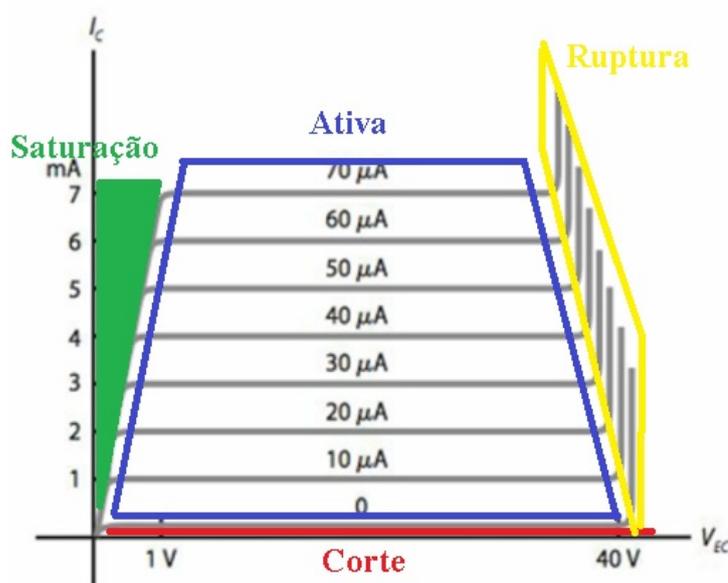


Figura 6 – Exemplo de curva I-V de um transistor semiconductor com as regiões de operação. Fonte: Adaptado de (MALVINO A.; BATES, 2011). Onde em vermelho está demonstrado a região de corte, em verde a região de saturação, de amarelo a região de ruptura e no retângulo azul a região ativa.

Segundo Malvino (MALVINO A.; BATES, 2011), o transistor de junção bipolar possui quatro regiões de operação, para uma polarização de modo emissor comum:

- **Ativa** : Característica dessa região de operação: base-emissor diretamente polarizada,

coletor-emissor reversamente polarizado. Onde corrente de coletor (IC) tem resposta proporcional a corrente de base (Ib).

- **Saturação:** Nessa região não se tem mais uma proporcionalidade entre a IC e Ib. Mesmo aumentando Ib, IC continua constante e com um valor máximo.
- **Corte:** região na qual base-emissor está polarizada reversamente ou coletor-emissor polarizada diretamente. A corrente de IC é muito baixa sendo insignificante.
- **Ruptura (*Breakdown*):** IC e  $V_{CE}$  excedem as especificações máximas do transistor podendo danificá-lo.

## 2.3 ANALISADOR DE PARÂMETROS

Um analisador de parâmetros de dispositivos semicondutores consiste em um equipamento que gera tensões e correntes controladas. Ao mesmo tempo realiza as medições destes valores e, com estas informações, é possível realizar o cálculo de parâmetros de dispositivos semicondutores sob teste (MALVINO A.; BATES, 2011).

O analisador de parâmetros gera a curva característica de componentes eletrônicos aplicando uma tensão no componente a ser testado. Ao mesmo tempo através, de um sistema de medição, mede a tensão e a corrente no componente. A corrente é medida através da queda de tensão em um resistor *shunt* que está em série com o componente. A medida da tensão aplicada no componente e a tensão medida no resistor são lidas por um osciloscópio.

Essas tensões servem para gerar a curva característica do componente eletrônico na tela de um osciloscópio que tenha a função XY. No canal X mede-se a tensão que é aplicada no componente eletrônico. Já no canal Y, é medida a queda de tensão no resistor *shunt*, para obter a medida de corrente elétrica no componente.

Na Figura 7, é demonstrado o esquema simplificado da conexão de um transistor aos geradores de base e gerador de coletor. Na Figura 7, resistor *shunt* (RE), resistor de coletor (RC) e resistor de base (RB), são resistores que podem ser selecionados no painel do equipamento. As conexões X e Y vão ligadas ao osciloscópio, sendo a conexão X ligada ao canal 1 e a conexão Y ligada ao canal 2.

O analisador de parâmetros, além de poder ser utilizado para testar componentes que possuem dois terminais como diodos, também pode testar componentes de três terminais como transistor de junção bipolar.

Para conseguir fazer os testes desses componentes de três terminais, é preciso de um outro gerador chamado gerador de base como visto na Figura 7, que funciona em

conjunto com o gerador de coletor aplicando degraus de tensão ou corrente no terceiro terminal do componente.

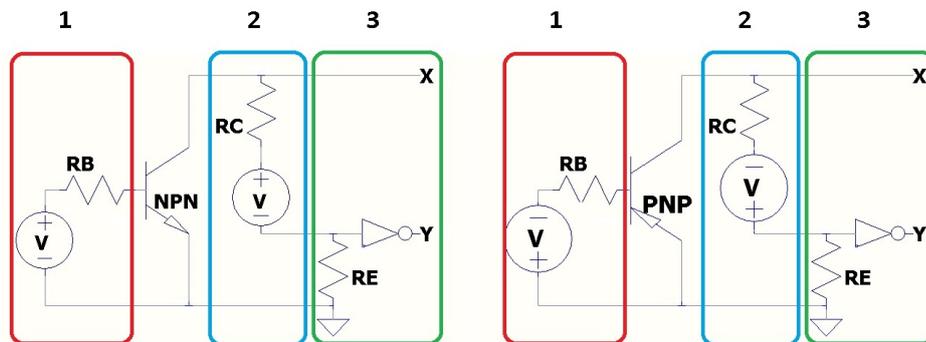


Figura 7 – Diagrama simplificado de ligações, feito no *LTspice*, da conexão de dois transistores no gerador de base (1), gerador de coletor (2) e aquisição de dados (3). Transistor NPN à esquerda e PNP na direita. Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As tensões aplicadas nos canais *X* e *Y* do osciloscópio são geradas na fonte gerador de coletor. A função *XY* do osciloscópio demonstra na tela a tensão aplicada no canal *X* (eixo horizontal), vezes a tensão no canal *Y* (eixo vertical), que representa a corrente, como mostrado na Figura 8.

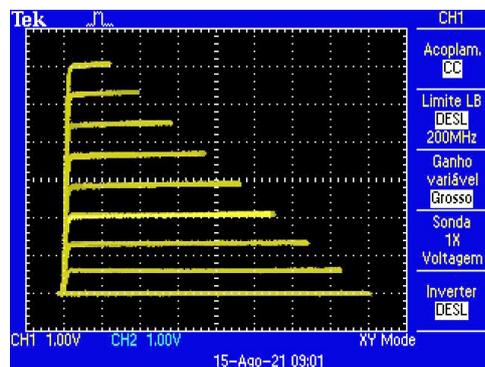


Figura 8 – Tela do osciloscópio onde é demonstrado a família de curvas características do transistor de junção bipolar BD139, utilizando a função XY. Fonte: elaborado pelo autor (2021).

## 2.4 MODELOS COMERCIAIS

Na realização desse trabalho, foram analisados três equipamentos comerciais existentes no mercado: Tektronix 370B, Keysight B2901B e Keithley 4200A-SCS por possuírem um valor mais acessível. Os equipamentos serão apresentados em um comparativo na seção 2.5, que está sinalizada mais adiante.

### 2.4.1 TEKTRONIX 370B

O equipamento Tektronix 370B possui um sistema para análise automática de componentes tais como: circuitos integrados, diodos, transistores, tiristores e optoeletrônicos. Esse equipamento, mostrado na Figura 9, analisa uma ampla variedade de componentes semicondutores, incluindo tiristores, SCRs, IGBTs, MOSFETs, componentes eletro-ópticos, células solares, relés de estado sólido. Possui resolução de  $1\text{ pA}$  de corrente e  $2\text{ }\mu\text{V}$  de tensão. O Tektronix 370B tem capacidade de aplicar tensão de até  $2\text{ kV}$  e pico de corrente de  $20\text{ A}$  no componente a ser testado.



Figura 9 – Rastreadores de curvas Tektronix 370B. Fonte: Adaptada de (TEKTRONIX, 2021a)

### 2.4.2 KEYSIGHT B2901B

O analisador de parâmetros Keysight B2901B, mostrado na Figura 10, possui capacidade de medição com resolução de  $1\text{ pA}$  e  $1\text{ }\mu\text{V}$  e tensão e corrente máxima de saída de  $210\text{ V}$  e  $3\text{ A}$  DC. Esse equipamento faz testes em semicondutores como: diodos, diodos laser, LEDs, fotodetectores, sensores, transistores de efeito de campo (FETs), transistores de junção bipolar (BJTs), circuitos integrados, resistor, varistor e termistores. O fabricante disponibiliza um *software* gratuito para que o usuário possa controlar o equipamento através de um computador (TECNOLOGIES, 2020).



Figura 10 – Analisador de parâmetros Keysight B2901B. Fonte: Adaptada de (TECNOLOGIES, 2020)

### 2.4.3 KEITHLEY 4200A-SCS

O equipamento Keithley 4200A-SCS, mostrado na Figura 11, faz medições de curvas I-V, além de extração automatizada de parâmetros em tempo real, gráfico de dados e funções de análise de caracterização de curva I-V.

Esse equipamento também testa semicondutores como diodos, FET, MOSFET, transistores de junção bipolar, células solares, LED, medições de resistividade e efeito Hall. Pode ser personalizado para atender mais necessidades de medição (KEITHLEY, 2021).

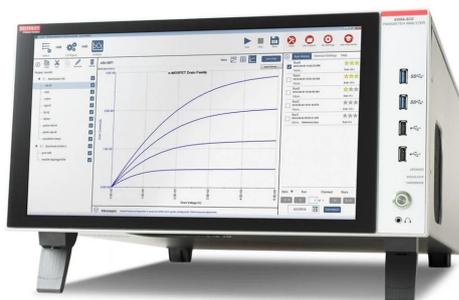


Figura 11 – Keithley 4200A-SCS Parameter Analyzer. Fonte: Adaptada de (KEITHLEY, 2021).

## 2.5 COMPARATIVO ENTRE EQUIPAMENTOS COMERCIAIS

A Tabela 2, apresenta um comparativo das especificações técnicas de cada um dos equipamentos. Onde na primeira linha, é apresentada a tensão máxima de saída, na segunda linha a corrente máxima DC fornecida por cada equipamento, a terceira linha apresenta a resolução mínima de tensão obtida na saída e a última linha mostra a resolução mínima da corrente.

Tabela 2 – Comparativo entre três analisadores de parâmetro

	Keithley 4200a	Keysight B2901B	Tektronix 370B
Tensão máxima de saída (V)	210 V	210 V	2000 V
Corrente máxima de saída (DC)	1 A	3 A	20 A
Resolução de medição de tensão (V)	0,2 $\mu$ V	1 $\mu$ V	2 $\mu$ V
Resolução de medição de corrente (A)	1 pA	1 pA	1 pA

Fonte: O próprio autor (2021).

## 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo serão detalhados os circuitos eletrônicos desenvolvidos para a construção do analisador de parâmetros de componentes eletrônicos, os quais implementam as funções necessárias para o funcionamento deste equipamento.

### 3.1 VISÃO GERAL DO CIRCUITO

O analisador de parâmetros, como apresentado na Figura 12, é composto por: gerador de coletor, gerador de base e um sistema de leitura de tensão que é realizada em um osciloscópio.

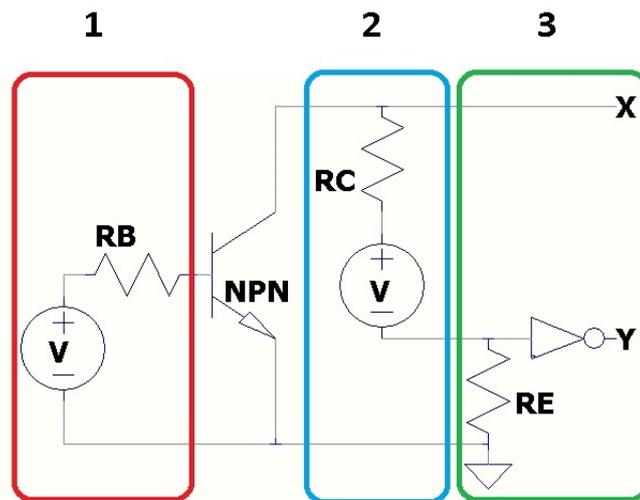


Figura 12 – Diagrama simplificado de ligações, feito no *LTspice*, da conexão de um transistor NPN no gerador de base (1), gerador de coletor (2) e aquisição de dados (3). Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

#### 3.1.1 MÓDULO GERADOR DE TENSÃO DE COLETOR

O circuito gerador de tensão de coletor apresentado na Figura 13, é composto por: resistor, potenciômetro, transformador, ponte retificadora, amplificador operacional, diodo retificador, transistores, chave alavanca de duas posições e um pólo, chave alavanca de duas posições e dois pólos e chaves seletoras rotativas de seis posições e um pólo.

O primário do transformador está ligado na rede elétrica de 220 V e o secundário tem capacidade de fornecer duas tensões e correntes selecionadas através de uma chave

alavanca duas posições e um pólo. As capacidades do transformador são: 30 V RMS com 1 A ou 80 V RMS com 400 mA.

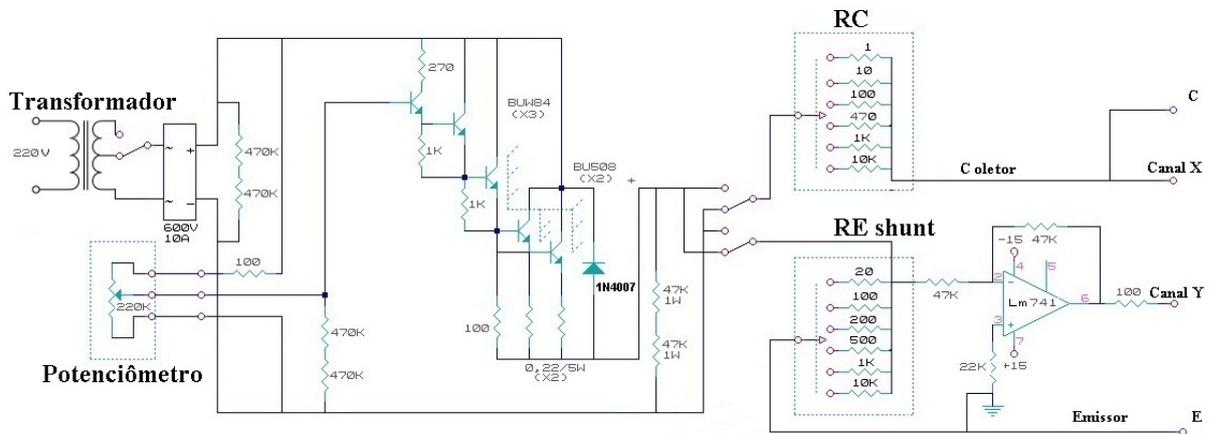


Figura 13 – Esquema eletrônico do circuito gerador de coletor. O circuito é capaz de gerar na saída tensão contínua pulsante com amplitude controlada por um transistor de potência BUW84. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A tensão selecionada na chave alavanca é retificada em onda completa através de uma ponte retificadora. Os semiciclos positivos da onda têm o dobro da frequência da rede. A amplitude dos semiciclos é controlada por um transistor de potência BU508, o qual tem sua base ligada a três transistores BUW84 ligados na configuração *Darlington* como pode ser visto nas Figuras 13 e 14.

A configuração *Darlington* foi utilizada para gerar corrente suficiente para que o transistor de potência BU508 consiga ter a máxima excursão de tensão 80 V e forneça a corrente necessária de até 1 A. A base do transistor BUW84 é ligada em um potenciômetro de 220 k $\Omega$  que está no painel do equipamento, através desse potenciômetro é controlada a amplitude da tensão de saída.

No transistor de potência BU508 que está em série com um resistor de 0,22  $\Omega$ , foi adicionado um diodo de proteção reversamente polarizado em paralelo. Para evitar flutuações de tensão na saída, no momento em que não tenha nenhum componente sendo testado, foram adicionados dois resistores. Os resistores, mostrados nas Figuras 13 e 14 são de 47 k $\Omega$ , e estão conectados em paralelo com a saída do BU508. Da mesma forma, para evitar flutuações de tensão, foram adicionados dois resistores de 470 k $\Omega$  ligados em série e conectados em paralelo com a saída da ponte retificadora.

A polaridade da tensão de saída do circuito pode ser invertida através de uma chave alavanca de duas posições e dois pólos, conforme apresentada na Figura 15, para polarizar o componente de forma direta ou reversa. Cada uma das duas saídas da chave alavanca, está ligada em uma chave seletora rotativa de seis posições e um pólo. As quais se chamam Resistor de coletor (RC) e Resistor *shunt* (RE) e estão representadas na Figura

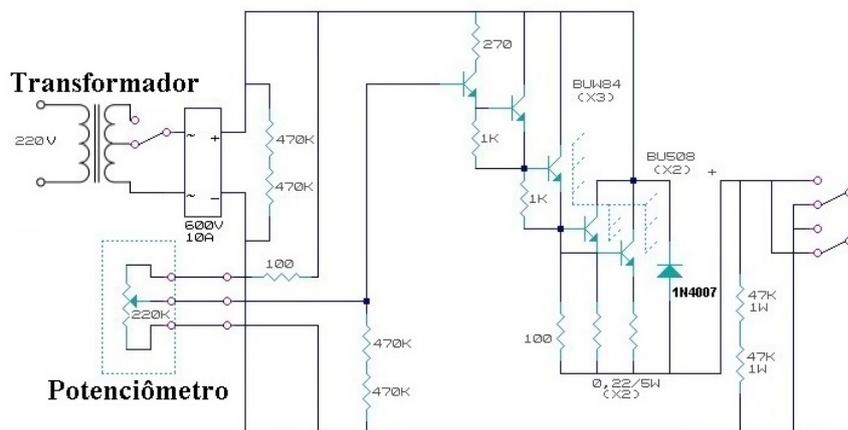


Figura 14 – Transformador, chave alavanca, potenciômetro, transistores na configuração *Darlington*, Transistores de potência. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

15.

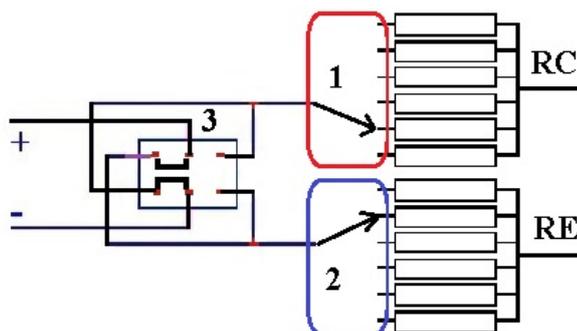


Figura 15 – (3) Chave alavanca de duas posições e dois pólos, (1) e (2) chaves seletoras rotativas de seis posições e um pólo, empregadas para selecionar qual RC e RE será conectado ao componente. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A chave RC mostrada na Figura 15, contém seis resistores, e serve para limitar a corrente máxima de saída através da escolha de um dos resistores que estão conectados à chave. Os valores dos resistores são respectivamente:  $1\ \Omega$ ,  $10\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$ ,  $470\ \Omega$ ,  $1\ k\Omega$  e  $10\ k\Omega$ . Os valores respectivos dos resistores *shunt* da Figura 15 são:  $20\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$ ,  $200\ \Omega$ ,  $500\ \Omega$ ,  $1\ k\Omega$  e  $10\ k\Omega$ .

Deve-se ter cuidado ao selecionar o resistor de RC de:  $1\ \Omega$ ,  $10\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$  na chave do gerador de coletor, pois os valores de corrente serão maiores que o suportado pelo equipamento, podendo danificá-lo. Esses valores foram escolhidos no projeto para poder ter uma corrente máxima com tensão menor que  $10\ V$ .

A posição de  $1\ \Omega$  é indicada para fazer medidas de fuga de corrente na junção PN de diodos ou transistores, na posição  $10\ \Omega$  a tensão não deve exceder a  $4\ V$  e na posição  $100\ \Omega$  a tensão máxima recomendada é  $40\ V$ .

Quando a chave RC estiver em uma das seguintes posições:  $470\ \Omega$ ,  $1\ k\Omega$  e  $10\ k\Omega$ , caso ocorra um curto circuito não danificará o equipamento, pois a corrente será menor que a corrente máxima que o equipamento pode fornecer.

Na saída da chave seletora RC, foram soldados dois condutores de cor vermelha, um condutor está ligado na saída que vai para o canal X do osciloscópio e o outro condutor identificado com a letra "C", que tem uma mini garra jacaré soldada na extremidade, onde é fixado um dos terminais do componente a ser testado.

Nos resistores que estão soldados na chave IC, é feita a medição da corrente, como apresentado na Figura 16, cada um dos seis resistores é um *shunt* de corrente. A tensão no resistor *shunt* é lida através de um *buffer* de tensão que utiliza o amplificador operacional LM 741. Conforme o resistor escolhido através da chave IC, é selecionada uma escala por divisão vertical na tela do osciloscópio servindo para melhorar a visualização do canal Y. Cada resistor *shunt* foi calculado para ter uma queda de tensão de  $1\ V$ , para facilitar o cálculo de IC.

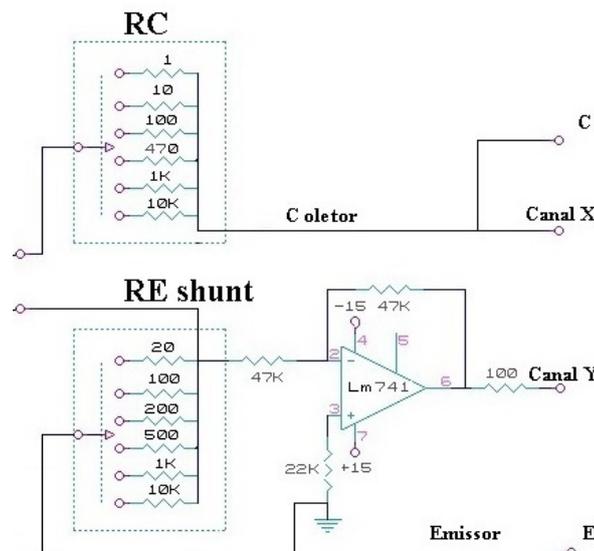


Figura 16 – Chave RC, Chave IC *shunt* de corrente, amplificador operacional LM 741 utilizado para medir à tensão do resistor *shunt*, saídas: coletor, emissor, canais 1 e 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na saída da chave seletora de seis posições foi soldado um condutor de cor azul que tem em sua outra extremidade uma mini garra jacaré, a qual é conectada ao outro terminal do componente e está identificado com a letra “E”.

### 3.1.2 MÓDULO GERADOR DE TENSÃO DE BASE

O circuito gerador de base, mostrado na Figura 17, está ligado a rele elétrica através de um transformador que tem seu primário ligado em  $220\ V$  e seu secundário fornece

15 V + 15 V com capacidade de corrente de 1 A. O transformador fornece tensão a oito sub-circuitos, que constituem o gerador de tensão de base.

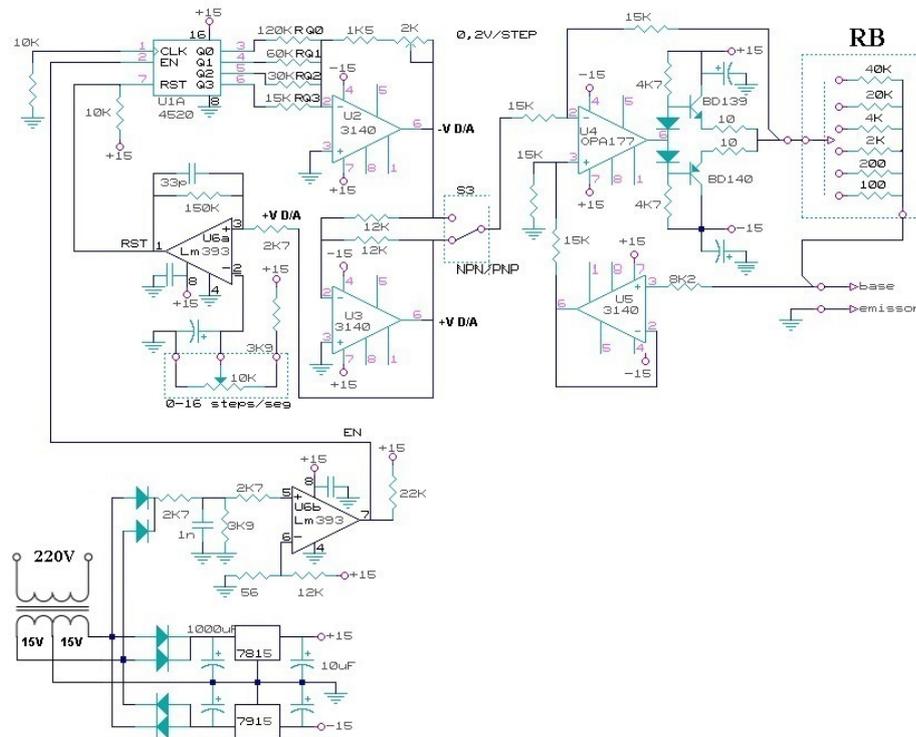


Figura 17 – Esquema eletrônico do circuito gerador de base. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

## 3.2 DETALHAMENTO DOS SUB-CIRCUITOS

Nesta seção serão detalhados os sub-circuitos que compõem o gerador de base.

### 3.2.1 REGULADORES DE TENSÃO LM 7815 E LM 7915

Os reguladores de tensão da Figura 18, foram utilizados nesse projeto para regular a tensão de saída para os sub-circuitos em +15 V e -15 V.

### 3.2.2 GERADOR DE PULSOS PARA O CI 4520 CONTADOR

Foi desenvolvido um gerador de pulsos baseado no circuito integrado (CI) comparador duplo LM 393, Figura 19, no pino 6 a entrada inversora foi ligada a um divisor de tensão calculado para 0,07 V.

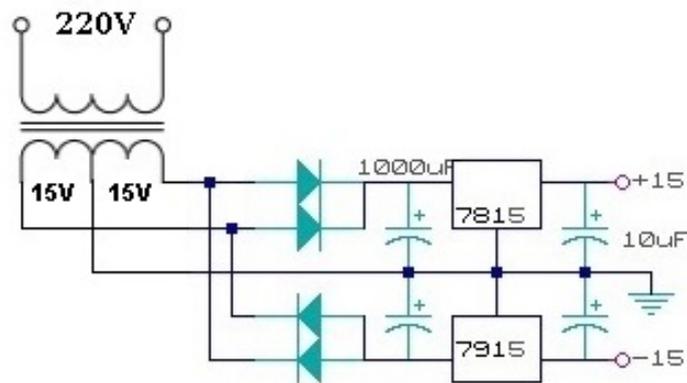


Figura 18 – Regulador de Tensão LM 7815 e LM 7915. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na entrada não inversora pino 5, são recebidos os pulsos da rede elétrica através de um divisor de tensão. Os pulsos da rede vem do secundário do transformador por um retificador de onda completa dobrando a frequência da rede elétrica.

Quando a tensão no pino 5 for menor que  $0,07\text{ V}$ , o pino de saída 7 vai estar com  $0\text{ V}$ , e quando a tensão no pino 5 for maior que  $0,07\text{ V}$  a tensão será  $15\text{ V}$ , criando assim no pino 7 borda de subida e descida 120 vezes por segundo.

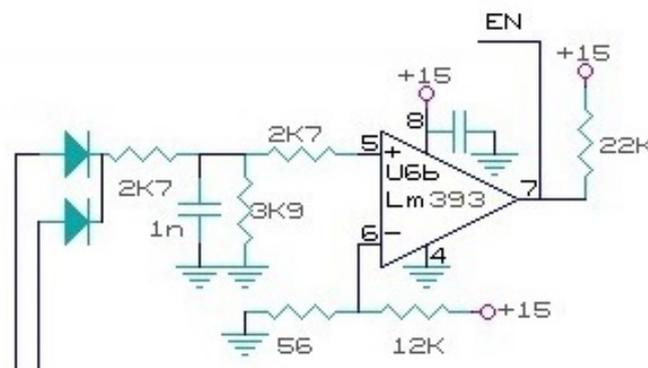


Figura 19 – Gerador de pulsos para o CI 4520 contador. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

### 3.2.3 CONTADOR DIGITAL DE DEGRAUS DE BASE

O circuito eletrônico utilizado para gerar os degraus de tensão de base é composto por um CI 4520, contador crescente binário, que pode ser configurado para ter disparo de borda de subida ou descida.

A entrada CLK, mostrada na Figura 20, é mantida em nível baixo e o contador avança em cada borda de descida do EN (*enable*). O contador é zerado, e começa a refazer a contagem binária a partir do zero quando é colocado nível alto no pino RST (*reset*).

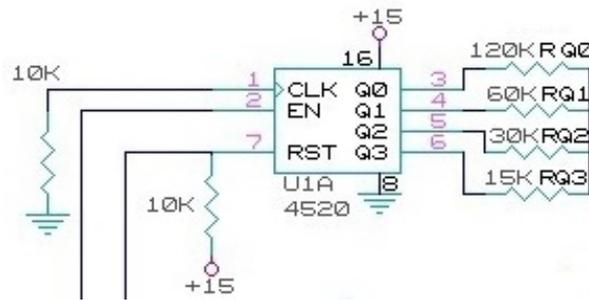


Figura 20 – Contador digital CI 4520. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

### 3.2.4 CONVERSOR D/A 4 BITS COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O conversor digital analógico é um circuito somador inversor composto por quatro resistores, onde cada um com valor diferente sendo um o dobro do outro, também existe a malha de realimentação para controlar o ganho e também controla a tensão máxima na saída. O conversor D/A da Figura 21 foi utilizado para gerar tensões de 0 a 3 V com 16 intervalos de 0,2 V cada, gerando assim uma escada de tensão.

Critério de escolha dos resistores: com base no *datasheet* do CI 4520 que tem corrente máxima de 4,6 mA, na saída de cada *bit* do contador, decidiu-se utilizar 1 mA por ser uma corrente muito abaixo da máxima fazendo com que o circuito funcione sem sobrecarga.

A Equação 3.1, que obedece a lei de Ohm mostra o cálculo do resistor Rq3, que é o de menor valor da saída mais significativa Q3, do circuito integrado 4520.

$$Rq3 = \frac{15 V}{1 mA} = 15 k\Omega \quad (3.1)$$

O cálculo demonstra que o valor mínimo é de 15 kΩ. Esse valor é utilizado na saída do *bit* mais significativo. Os demais resistores da saída do CI 4520 têm seu valor dobrado a cada saída tendo assim uma corrente sempre menor que 1 mA, ficando respectivamente: Rq0 = 15 kΩ, Rq2 = 30 kΩ, Rq1 = 60 kΩ, Rq0 = 120 kΩ.

O critério da escolha da tensão máxima da saída do Conversor D/A foi por -3 V, pois com este valor de tensão é possível controlar os outros sub-circuitos que dependem dessa tensão, e também resulta em um valor compatível com uma possível substituição do CI 4520 por um microcontrolador. Depois de definido o resistor de cada *bit*, é feito o cálculo do resistor de realimentação responsável pela definição do valor máximo de tensão na saída do Conversor D/A 4 bits que nesse circuito foi definido em -3 V. Calcula-se

conforme as Equações 3.2 e 3.3.

$$-3 = -R_f \left( \frac{15V}{120K} + \frac{15V}{60K} + \frac{15V}{30K} + \frac{15V}{15K} \right) \quad (3.2)$$

$$3 = R_f (0,001875)$$

$$R_f = 1600 \, \Omega \quad (3.3)$$

O resistor de realimentação  $R_f$  foi calculado em  $1600 \, \Omega$ . Para chegar nesse valor optou-se por utilizar um resistor de  $1500 \, \Omega$  em série com um *trimpot* ajustável de  $0$  à  $2000 \, \Omega$ .

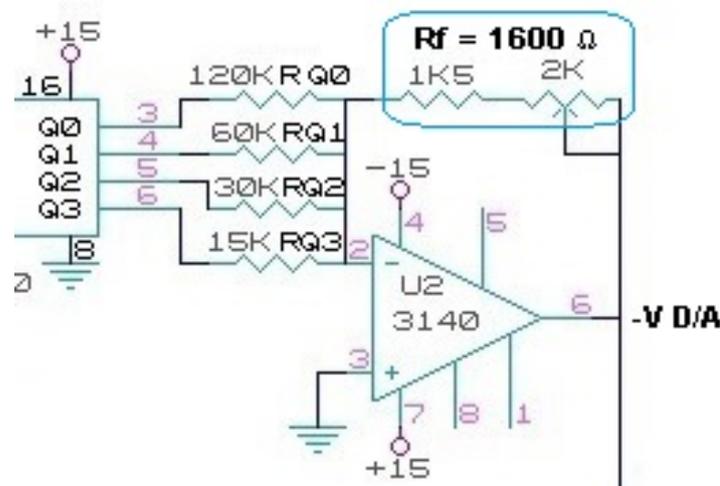


Figura 21 – Conversor D/A 4 bits com amplificador operacional. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A saída do conversor digital é ligada a dois sub-circuitos: amplificador inversor com operacional e ao circuito que limita o número máximo de curvas. Para simplificação deste projeto inicial, optou-se por não implementar a compensação de *offset* no CA 3140.

### 3.2.5 AMPLIFICADOR INVERSOR COM OPERACIONAL

No circuito da placa do gerador de tensão de base, foi utilizado o amplificador na configuração inversor, apresentado na Figura 22. Para receber o sinal que vem do conversor digital e inverter sua polaridade para ser aplicado a dois sub-circuitos: amplificador *push-pull* e o circuito que limita o número máximo de curvas.

### 3.2.6 CIRCUITO QUE LIMITA O NÚMERO MÁXIMO DE CURVAS

Nesse projeto, foi utilizado o circuito integrado comparador LM 393, como mostrado na Figura 23. O comparador recebe uma tensão positiva de  $0$  a  $3 \, V$ , que vem do circuito

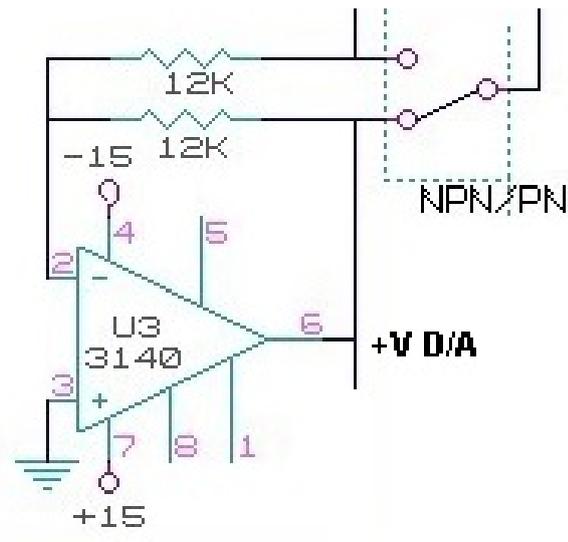


Figura 22 – Amplificador Operacional na configuração inversor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

amplificador inversor e é aplicada na entrada não inversora 3. Na entrada inversora 2 é aplicada uma tensão positiva que varia seu valor entre 0 e 5 V através de um potenciômetro de 10 k $\Omega$ . A saída 1 é aplicada ao pino 7 do circuito integrado 4520 para fazer zerar o contador e dessa forma limitando número máximo de curvas.

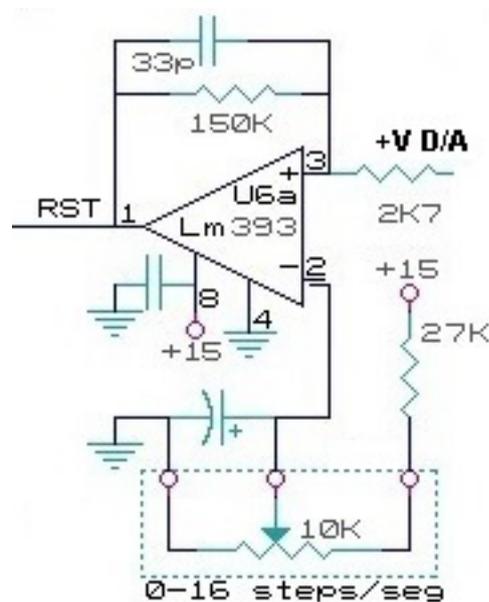


Figura 23 – Circuito que limita o numero máximo de Curvas. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

### 3.2.7 FONTE DE CORRENTE

O circuito consiste em uma fonte de corrente controlada por tensão, que serve para transformar os degraus de tensão em degraus de corrente para serem aplicados na base do transistor, que será testado.

O circuito utiliza dois amplificadores operacionais, apresentado na Figura 24, sendo possível usar um amplificador operacional duplo e, assim, minimizando custo e espaço na placa.

Os resistores empregados nos dois amplificadores operacionais têm o mesmo valor, conforme o artigo técnico (KEIM, 2020), podendo-se escolher outros valores de resistores.

O primeiro amplificador operacional U4, recebe em sua entrada inversora os degraus de tensão, que podem ser positivos ou negativos. A entrada não inversora é conectada a um divisor de tensão que é formado por dois resistores, ambos de  $15\text{ k}\Omega$ .

O divisor de tensão tem um dos lados ligado ao terra e o outro lado está conectado à saída de um *buffer* seguidor de tensão U5, o qual pega uma amostra de tensão da saída. Essa realimentação feita com o divisor de tensão e o *buffer* U5, segundo (KEIM, 2020), garante uma boa precisão. Para simplificação deste projeto inicial, optou-se por não implementar a compensação de *offset* no OPA 177 e CA 3140.

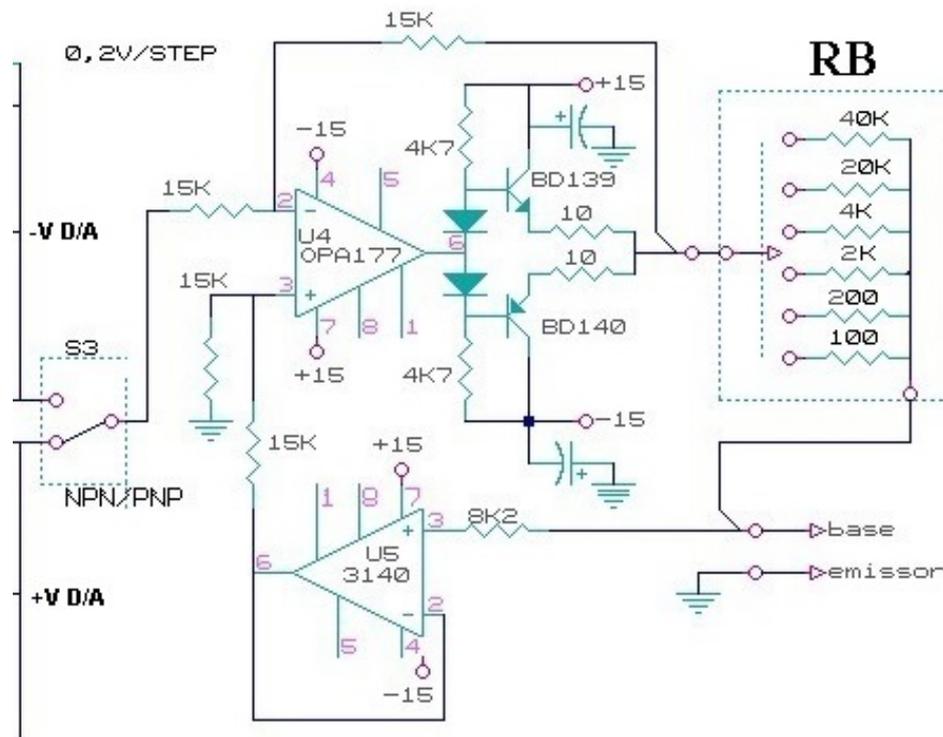


Figura 24 – Diagrama esquemático da fonte de corrente. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

### 3.2.8 AMPLIFICADOR *PUSH-PULL*

O amplificador *push-pull* visto na Figura 25, é composto por dois transistores configurados como seguidores de emissor um PNP e outro NPN. Este circuito é utilizado por ter alto ganho de potência, possuir alta resistência de entrada e baixa resistência de saída (JUNIOR, 2013). O *push-pull* vai trabalhar amplificando degraus de corrente.

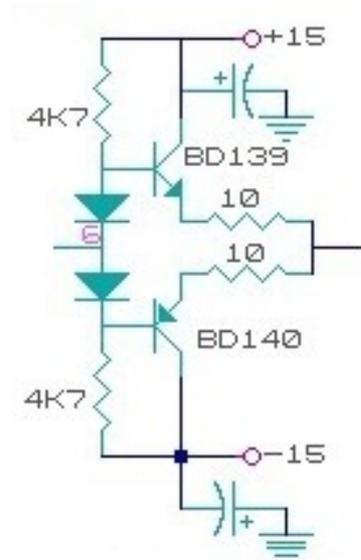


Figura 25 – Diagrama esquemático do amplificador *push-pull*. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

### 3.3 PROCEDIMENTO PARA UTILIZAÇÃO DO ANALISADOR

O analisador de componentes funciona em conjunto com osciloscópio que tenha a função *XY*. Após colocar o osciloscópio e o analisador na bancada deve-se conferir a tensão das tomadas e a voltagem dos equipamentos. O analisador está configurado para funcionar em 220 V.

Depois da verificação das tensões de funcionamento, é necessário a conexão da saída *X* e *Y* do analisador na entrada dos canais 1 e 2 do osciloscópio, através de dois cabos que tenham conexões BNC na sua extremidade. O osciloscópio deve ser configurado na função *XY* e cada um dos canais deve estar selecionado em 0,5 V por divisão. A imagem deve estar configurada para ficar bem no centro da tela.

O painel do analisador de parâmetros Figura 26, deve ser configurado da seguinte forma: potenciômetro *Vce* no mínimo, chave *RC* em 10 k $\Omega$ , chave *IC* em 0,1 mA, chave alavanca 30 V/80 V deve estar para o lado esquerdo que é 30 V. Esta configuração serve para componentes de dois e três terminais, os quais são conectados nos condutores nomeados com “C” e “E”.



Figura 26 – Amplificador *push-pull*. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Após ligar o componente deve-se aumentar a tensão no potenciômetro *Vce* com cautela até a metade, caso não surja nenhuma imagem deve-se trocar a posição da chave alavanca NPN/PNP do gerador de coletor, pois o componente pode estar reversamente polarizado, e caso seja esse a causa da não formação da imagem, estará se testando a fuga de tensão reversa do componente.

Assim que a imagem começar a se formar deve-se ir ajustando a chave *IC* para ter uma melhor resolução e a chave *RC* para aplicar mais corrente ao componente, também deve-se ir girando o potenciômetro para aplicar mais tensão entre “C” e “E” e dessa forma

obtendo mais corrente. Após a imagem começar a se formar deve-se ajustar os controles de posição vertical e horizontal bem como a leitura das tensões que ficam mais adequadas nos canais do osciloscópio.

Para componentes de três terminais, além das configurações anteriores é preciso configurar o potenciômetro que limita no número de curvas, deixando ele na metade e escolhendo a corrente que será aplicada na no condutor “B” que será ligado ao terceiro terminal do componente. Deve-se começar com a chave  $I_b$  em  $5 \mu A$ . Caso não apareça imagem deve trocar a posição da chave NPN/PNP do gerador de coletor pois o componente pode estar sendo polarizado reversamente e dessa forma não gera imagem a não ser que o componente tenha fuga em polarização reversa.

Como base para futuros testes, pode-se configurar o analisador da forma que foi feita neste trabalho.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado o conjunto de procedimentos de verificação do funcionamento do analisador de parâmetros de componentes eletrônicos conforme visto no fluxograma da Figura 27. Esse capítulo está organizado da seguinte forma: primeiramente será feita a análise dos transistores através da medição do seu ganho usando um medidor RLC digital ICEL modelo LC-301, com resolução de 3 1/2 dígitos (3 dígitos que podem tomar valores entre 0 e 9, e um quarto dígito que pode tomar valor 0 ou 1) (ICEL, 2008). Após esta medição, os mesmos componentes foram testados em um circuito montado para gerar correntes de base e de coletor em uma *protoboard*. Na sequência foram testados os mesmos componentes, usando o analisador de parâmetros de componentes eletrônicos.



Figura 27 – Fluxograma dos procedimentos. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O parâmetro que foi analisado é o ganho dos transistores, chamado também de  $\beta$  ou  $hfe$ . Nos transistores de junção bipolar, o  $hfe$  é dado pela relação entre correntes de coletor ( $I_C$ ) e de base ( $I_b$ ) na região ativa, como mostrado na Equação 4.1.

$$hfe = \frac{I_C}{I_b} \quad (4.1)$$

### 4.1 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR O HFE

Nesta seção serão apresentados dois procedimentos de bancada utilizados para obter uma medida de  $hfe$  de quatro transistores de junção bipolar, fora do analisador de parâmetros. O uso da combinação destes dois procedimentos, justifica-se pelo fato de que a determinação do  $hfe$  usando somente o multímetro digital, não permite realizar o teste com diferentes tensões de base. Desta forma, optou-se por montar um experimento auxiliar para determinação do  $hfe$  usando circuitos auxiliares de geração de tensão de base e de coletor (mostrado na seção 4.1.2).

#### 4.1.1 MEDIÇÃO DO HFE COM MULTÍMETRO DIGITAL

Primeiramente, mede-se o ganho de cada transistor, na região ativa, usando um multímetro digital que tem o medidor de  $hfe$ . As medições foram feitas com os transistores de junção bipolar BD139, BC546, BD140 e BC556 e os resultados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Ganho medido dos transistores de junção bipolar, os valores  $hfe_{mín}$  e  $hfe_{máx}$  foram obtidos do *datasheet*.

Transistor	tipo	hfe medido	$hfe_{mín}$	$hfe_{máx}$
BD139	NPN	140	40	250
BD140	PNP	138	40	250
BC546	NPN	387	120	500
BC556	PNP	285	110	450

Fonte: O próprio autor (2021).

#### 4.1.2 MEDIÇÃO HFE COM CIRCUITO AUXILIAR DE POLARIZAÇÃO

Neta etapa de verificação, cada transistor foi polarizado individualmente, com fontes ajustáveis de tensão contínua de base e de coletor, usando dois circuitos próprios de excitação, mostrados na Figura 28.

Foram usados na polarização, resistores de base e de coletor, com valores nominais  $R_B = 27\text{ k}\Omega$  e  $R_C = 470\ \Omega$ . Desta forma, foi possível polarizar os quatro transistores, individualmente, para trabalhar na região ativa.

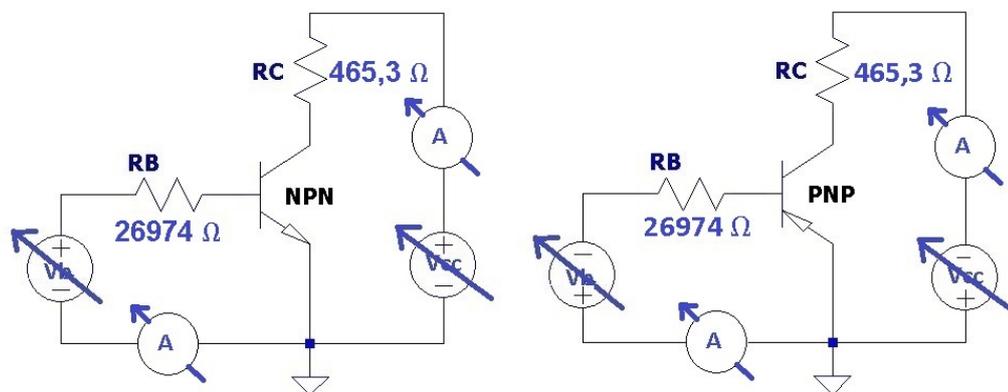


Figura 28 – Circuito teste montado na *protoboard*, para determinação dos  $hfes$  nos transistores NPN a esquerda e PNP a direita. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os circuitos de polarização em modo de emissor comum mostrados na Figura 28, foram usados para os testes dos transistores. Em ambos os diagramas são apresentados os valores reais dos resistores, sendo  $R_B = 26974 \pm 110\ \Omega$  e  $R_C = 465,30 \pm 0,41\ \Omega$ .

Cada um dos transistores de junção bipolar BD139, BC546, BD140 e BC556 foi polarizado individualmente. Nas Tabelas 4 a 7, estão apresentados os resultados das medições para diferentes correntes de base e tensão  $V_{cc}$  aplicadas aos transistores. Nas Tabelas de 19 a 22 no apêndice B, os dados das medições são apresentados de forma completa.

Tabela 4 – Resultados da verificação do  $hfe$  para o transistor BD139.

Vcc (V)	Vce (V)	Ib ( $\mu A$ )	IC (mA)	$hfe$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{IC}(mA)$	$u_{hfe}\%$
5,03	4,799	5	0,49	98,00	4,015	0,005	1,09
5,00	4,486	10	1,08	108,00	4,030	0,007	0,72
4,99	4,184	15	1,74	116,00	4,045	0,009	0,61
4,99	3,870	20	2,40	120,00	4,060	0,011	0,56
4,96	3,510	25	3,10	124,00	4,075	0,013	0,53
5,00	3,225	30	3,79	126,33	4,090	0,015	0,51

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 5 – Resultados da verificação do  $hfe$  para o transistor BC546.

Vcc (V)	Vce (V)	Ib ( $\mu A$ )	IC (mA)	$hfe$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{IC}(mA)$	$u_{hfe}\%$
5,07	3,771	5	2,74	274,00	4,015	0,01222	2,44
5,06	2,558	10	5,35	267,50	4,030	0,02005	2,01
4,95	1,220	15	7,92	264,00	4,045	0,02776	1,85
4,95	0,398	20	9,74	243,50	4,060	0,03322	1,66
5,05	0,255	25	10,28	205,60	4,075	0,03484	1,39
5,05	0,193	30	10,41	173,50	4,090	0,03523	1,17

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 6 – Resultados da verificação do  $hfe$  para o transistor BD140.

Vcc (V)	Vce (V)	Ib ( $\mu A$ )	IC (mA)	$hfe$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{IC}(mA)$	$u_{hfe}\%$
4,99	4,682	5	0,66	132,00	4,015	0,00598	1,20
5,00	4,380	10	1,31	131,00	4,030	0,00793	0,79
5,00	4,078	15	1,98	132,00	4,045	0,00994	0,66
5,00	3,750	20	2,69	134,50	4,060	0,01207	0,60
5,01	3,449	25	3,35	134,00	4,075	0,01405	0,56
5,00	3,114	30	4,04	134,67	4,090	0,01612	0,54

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 7 – Resultados da verificação do  $hfe$  para o transistor BC556.

Vcc (V)	Vce (V)	Ib ( $\mu A$ )	IC (mA)	$hfe$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{IC}(mA)$	$u_{hfe}\%$
5,00	4,409	5	1,32	264,00	4,015	0,00796	1,59
5,00	3,765	10	2,61	261,00	4,030	0,01183	1,18
5,02	3,210	15	3,86	257,33	4,045	0,01558	1,04
4,97	2,600	20	5,07	253,50	4,060	0,01921	0,96
4,97	2,078	25	6,20	248,00	4,075	0,02260	0,90
4,95	1,534	30	7,31	243,67	4,090	0,02593	0,86

Fonte: O próprio autor (2021).

O conjunto destes resultados será utilizado como base de comparação para os resultados obtidos nos testes com o analisador de parâmetros proposto nesse trabalho.

Nos resultados apresentados nas tabelas resumidas, cada linha corresponde a um valor de corrente de base aplicado no circuito de polarização. Como resultado das medições, têm-se diferentes valores de corrente de coletor.

A partir dos valores das correntes de base e coletor calculou-se o ganho  $hfe$ . A determinação das incertezas de medição foi feita com uso do manual do fabricante do multímetro ICEL (2009) e no livro do (BALBINOT, 2019). A incerteza da corrente de base  $u_{Ib}$  é calculada pela Equação 4.2 a partir do manual do fabricante ICEL (2009). A corrente de base  $Ib$  foi gerada nos testes com exatidão suficiente para suprimir as decimais dos números utilizados nestes cálculos.

$$u_{Ib} = 0,003 \times Ib(\mu A) + 4 \times 1 \quad [\mu A] \quad (4.2)$$

Na Equação 4.3 está apresentado o cálculo da incerteza da corrente de coletor  $u_{IC}$  com base no manual do fabricante ICEL (2009).

$$u_{IC} = 0,003 \times IC(mA) + 4 \times 0,001 \quad [mA] \quad (4.3)$$

O cálculo da incerteza de  $u_{hfe}$  está representado na Equação 4.4: A dedução da equação encontra-se no apêndice A.

$$u_{hfe} = hfe \times \sqrt{\left(\frac{1}{IC}\right)^2 \times (u_{IC})^2 + \left(\frac{1}{Ib}\right)^2 \times (u_{Ib})^2} \quad (4.4)$$

## 4.2 RESULTADOS DO ANALISADOR DE PARÂMETROS DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Como foi detalhado no Capítulo 3, o analisador de parâmetros de componentes eletrônicos gera as tensões de polarização dos transistores para permitir a análise gráfica utilizando um osciloscópio no modo de exibição *XY*. Neste modo de visualização, o eixo *Y* (vertical) apresenta a corrente de coletor e o eixo *X* (horizontal) apresenta a tensão entre coletor e emissor do transistor sob teste.

A Figura 29 apresenta o resultado da análise da família de curvas características *IC-Vce* (corrente de coletor  $\times$  tensão coletor-emissor) do transistor BD139. A partir desta imagem, será feita a explicação do cálculo do parâmetro *hfe*.

A imagem apresenta a tela do osciloscópio digital de dois canais, onde no canal 2 (CH2) está sendo feita a medição da corrente *IC* e no canal 1 (CH1) está sendo feita a medição da tensão *Vce*. Nesta imagem é visto um conjunto de sete curvas *IC-Vce* para o transistor BD139, todas descritas com números. A curva '0' é gerada com corrente de base  $I_b = 0$ , ou seja, é a corrente de corte do coletor. Na curva '1', a corrente de base é igual a  $I_b = 5 \mu A$ . As curvas subsequentes são geradas com correntes de base acrescidas de  $5 \mu A$ . As correntes de base utilizadas no cálculo foram medidas com um multímetro da marca ICEL modelo 6520.

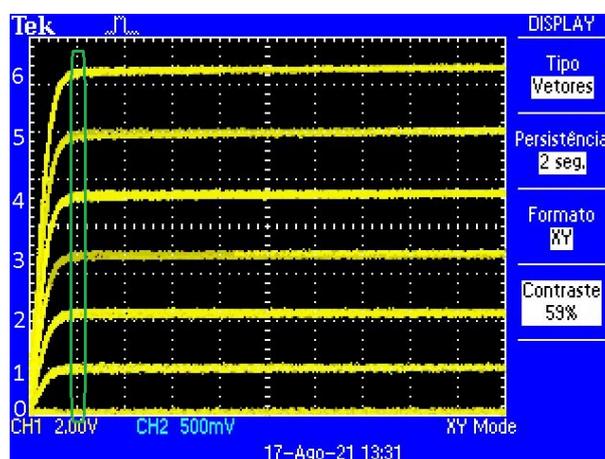


Figura 29 – Família de curvas características *IC-Vce* do transistor BD139. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Cabe aqui ressaltar, que conforme foi explicado no Capítulo 3, a corrente de coletor é representada por uma tensão medida sobre um resistor *shunt*, com valor selecionável pela chave *IC*, como visto na Figura 30. A tensão sobre o resistor *shunt* da chave *IC* é lida no canal 2 do osciloscópio digital.

Para determinar o valor da corrente de coletor *IC* por divisão da tela do osciloscópio, basta selecionar no painel "Gerador de Coletor", qual o valor da escala na chave *IC*. Na



Figura 30 – Gerador de coletor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

família de curvas apresentada na Figura 29 a chave está configuração em 1  $mA$  por divisão. Desta forma, para cada divisão na vertical do osciloscópio têm valor equivalente de 1  $mA$  de corrente de coletor e para cada uma das cinco subdivisões têm-se 0,2  $mA$ .

Para determinar o valor de  $IC$ , aplica-se a Equação 4.5 aos valores obtidos na tela do osciloscópio digital.

$$IC = m \times K_{IC} \times V_{CH2} \quad (4.5)$$

Na qual  $m$  corresponde ao número de divisões da tela do osciloscópio,  $K_{IC}$  é a escala de corrente configurada pela chave seletora  $IC$  no painel de configuração do analisador de parâmetros e  $V_{CH2}$  é a tensão medida pelo canal 2 (vertical) do osciloscópio.

A corrente de coletor está representada mais à esquerda do gráfico e, para fins de cálculo, vamos escolher o ponto onde  $V_{CH1} = 2 V$ , o qual corresponde a marcação em verde. A corrente de base  $I_b$  é gerada a partir de uma fonte de corrente constante, como descrito no Capítulo 3. A saída dessa fonte opera com até 16 degraus de corrente, os quais têm seu valor ajustado pela chave seletora  $I_b$ , vista na figura 31, do gerador de base.

Desta forma, a partir da inspeção visual da tela do osciloscópio, pode-se inferir qual é o valor da corrente média de base multiplicando-se o número da curva ( $n$ ) pelo fator de incremento  $K_{I_b}$ , (equação 4.6).

$$I_b = n \times K_{I_b} \quad (4.6)$$

O valor médio da corrente de base na curva quatro é igual a:

$$I_b = 4 \times 5 \mu A = 20 \mu A \quad (4.7)$$

Após obter os valores de  $I_b$  e de  $IC$ , pode-se calcular o valor de  $hfe$  usando a Equação 4.1. E dessa forma o ganho médio na curva quatro seria igual a:

$$hfe = \frac{2,3 mA}{19,97 \mu A} = 115,2 \quad (4.8)$$



Figura 31 – Gerador de base. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados obtidos da análise de valores gerados no teste mostrado na Figura 29. Foi analisada cada uma das sete curvas, a partir da aproximação de cada curva no ponto  $V_{CH1} = 2\text{ V}$ , onde estão localizadas as subdivisões mais próximas do início da região ativa, apresentada na imagem da tela do osciloscópio.

A Tabela 8 apresenta os valores utilizados para determinar o  $hfe$  médio para o transistor BD139. A Tabela 9 apresenta as incertezas das medições de  $hfe$  para o transistor BD139 e foi feita com base no livro do (BALBINOT, 2019) e nos manuais dos instrumentos de medição utilizados.

Na primeira coluna da Tabela 9, encontra-se o número da curva. Na segunda coluna da Tabela 9, está a incerteza da leitura da tela do osciloscópio  $u_{vre}$ , calculada pela Equação 4.9, com base no livro do (BALBINOT, 2019):

Tabela 8 – Ganho  $hfe$  do transistor BD139 com tensão  $V_{ce} = 2\text{ V}$ .

Curva	$ch1_{min}$ (V)	$ch1_{máx}$ (V)	$ch1_{méd}$ (V)	$I_{c_{méd}}$ (mA)	$I_b$ ( $\mu\text{A}$ )	$hfe_{méd}$
0	0,0	0,2	0,05	0,00	0,00	0,00
1	0,8	1,2	0,50	0,50	5,06	98,81
2	2,0	2,4	1,10	1,10	10,04	109,56
3	3,2	3,6	1,70	1,70	15,06	112,88
4	4,4	4,8	2,30	2,30	19,97	115,17
5	5,8	6,2	3,00	3,00	24,99	120,05
6	7,2	7,4	3,65	3,65	29,97	121,79

Fonte: O próprio autor (2021).

O valor de tensão estimado para cada uma das curvas é dado pela média  $ch1_{méd}$  (V), entre a parte inferior da curva  $ch1_{min}$  (V) e da parte superior  $ch1_{máx}$  (V). Após ter o valor estimado, calculou-se a corrente IC média ( $I_{c_{méd}}$  (mA)) multiplicando-se o  $ch1_{méd}$  (V) pelo valor selecionado na chave IC do gerador de coletor. A corrente  $I_b$  teve seu valor estimado multiplicando-se o número do valor da curva pela corrente selecionada na chave

Tabela 9 – Incertezas do ganho  $hfe$  do transistor BD139 com tensão  $V_{ce} = 2 V$ .

Curva	$u_{vre}(V)$	$u_{osc}(V)$	$u_{vc}(V)$	$u_{Ic}(mA)$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{hfe}$	$u_{hfe}\%$
0	0,06	0,06	0,13	0,13	0,029	0,00	0
1	0,12	0,07	0,13	0,13	0,032	26,39	26,70%
2	0,12	0,08	0,14	0,14	0,035	13,85	12,64%
3	0,12	0,09	0,15	0,15	0,038	9,63	8,54%
4	0,12	0,10	0,15	0,15	0,040	7,59	6,59%
5	0,12	0,11	0,12	0,12	0,043	4,99	4,15%
6	0,06	0,12	0,12	0,12	0,046	4,06	3,33%

Fonte: O próprio autor (2021).

$I_b$  do gerador de base. Após ter os valores das correntes  $I_c(\text{méd})$  e  $I_b$ , foi feita a divisão para se obter o ganho médio  $hfe(\text{méd})$ .

$$u_{vre} = \frac{ch1(\text{máx}) - ch1(\text{min})}{2 \times \sqrt{3}} [V] \quad (4.9)$$

A terceira coluna da Tabela 9, está a incerteza do osciloscópio  $u_{osc}$ , calculada pela Equação 4.10, com base no manual (TEKTRONIX, 2018):

$$u_{osc} = 0,003 \times V_{ch}(\text{méd}) + 0,1 + 0,001 [V] \quad (4.10)$$

A combinação das duas incertezas  $u_{vre}$  e  $u_{osc}$  está na quarta coluna da Tabela 9 e é calculada pela Equação 4.11 conforme (BALBINOT, 2019).

$$u_{vc} = \sqrt{(u_{vre})^2 + (u_{osc})^2} [V] \quad (4.11)$$

Na quinta coluna da Tabela 9, está calculada pela Equação 4.12 a incerteza da corrente de coletor  $u_{IC}$ .

$$u_{IC} = m \times K_{IC} \times u_{vc} [A] \quad (4.12)$$

A corrente de base foi medida com um multímetro do fabricante ICEL (2009). E por esse motivo utilizou-se na sexta coluna da Tabela 9, a Equação 4.13 fornecida no manual do fabricante, para a incerteza da corrente de base  $u_{Ib}$ .

$$u_{Ib} = 0,001 \times I_b(\mu A) + 5 \times 0,01 [\mu A] \quad (4.13)$$

Na sétima coluna da Tabela 9, está o cálculo da incerteza de  $hfe$ , denominado  $u_{hfe}$ , representado pela Equação 4.4.

Na oitava coluna da Tabela 9, encontra-se a incerteza percentual de  $hfe$  (Equação 4.14).

$$u_{hfe}\% = \frac{u_{hfe}}{hfe_{\text{méd}}} [\%] \quad (4.14)$$

#### 4.2.1 RESULTADO DO TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR NPN: BC546

Nesta seção são apresentados os resultados para o transistor de junção bipolar NPN BC546. Os quais foram calculados com as mesmas fórmulas que para o BD139. A Tabela 10 apresenta os valores utilizados para determinar o  $hfe$  médio para o transistor BC546. A Tabela 11 apresenta as incertezas das medições de  $hfe$  para o transistor BC546 e foi feita com base no livro do (BALBINOT, 2019) e nos manuais dos instrumentos de medição utilizados.

Na imagem 32 é observado um conjunto de sete curvas IC-Vce do transistor BC546, onde cada curva é descrita com um número de 0 à 6. Para os cálculos, foi escolhido o ponto onde  $V_{CH1} = 6 V$ , o qual corresponde a marcação do retângulo em verde. A chave seletora IC do gerador de coletor está na posição de  $2 mA$  e a chave Ib do gerador de base em  $5 \mu A$  por curva.

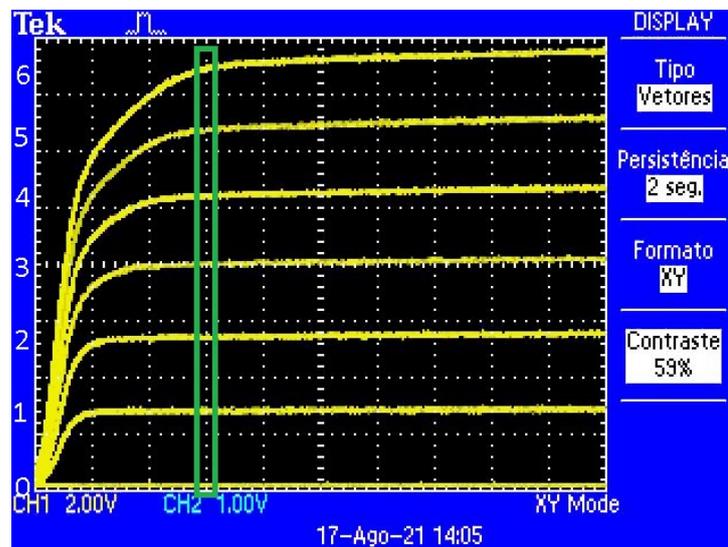


Figura 32 – Família de curvas BC546. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 10 – Ganho  $hfe$  do transistor BC546 com tensão  $Vce = 6 V$ .

Curva	$ch1_{min}$ (V)	$ch1_{máx}$ (V)	$ch1_{méd}$ (V)	$Ic_{méd}$ (mA)	$Ib$ ( $\mu A$ )	$hfe_{méd}$
0	0,0	0,2	0,10	0,00	0,00	0,00
1	1,2	1,6	1,40	1,40	5,06	276,68
2	2,6	2,8	2,70	2,70	10,04	268,92
3	3,8	4,0	3,90	3,90	15,06	258,96
4	5,0	5,4	5,20	5,20	19,97	260,39
5	6,2	6,6	6,40	6,40	24,99	256,10
6	7,2	7,6	7,40	7,40	29,97	246,91

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 11 – Incertezas do Ganho  $h_{fe}$  do transistor BC546 com tensão  $V_{ce} = 6 V$ .

Curva	$u_{vre}(V)$	$u_{osc}(V)$	$u_{vc}(V)$	$u_{Ic}(mA)$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{hfe}$	$u_{hfe}\%$
0	0,06	0,06	0,13	0,13	0,029	0,00	0
1	0,12	0,08	0,10	0,10	0,032	19,99	7,22%
2	0,06	0,11	0,12	0,12	0,035	11,98	4,45%
3	0,06	0,13	0,17	0,17	0,038	11,36	4,39%
4	0,12	0,15	0,19	0,19	0,040	9,43	3,62%
5	0,12	0,17	0,20	0,20	0,043	8,21	3,20%
6	0,12	0,19	0,19	0,19	0,046	6,23	2,52%

Fonte: O próprio autor (2021).

#### 4.2.2 RESULTADO DO TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR PNP: BD140.

Nesta seção serão apresentados os resultados para o transistor de junção bipolar PNP BD140. Os quais foram calculados com as mesmas fórmulas que para o BD139. A Tabela 12 apresenta os valores utilizados para determinar o  $h_{fe}$  médio para o transistor BD140. A Tabela 13 apresenta as incertezas das medições de  $h_{fe}$  para o transistor BD140 e foi feita com base no livro do (BALBINOT, 2019) e nos manuais dos instrumentos de medição utilizados.

Na imagem 33 é observado um conjunto de sete curvas IC-Vce do transistor BC546, cada curva descrita com um número de 0 à 6. Para os cálculos, foi escolhido o ponto onde  $V_{CH1} = 2 V$ , o qual corresponde a marcação do retângulo em verde. A chave seletora IC do gerador de coletor está na posição de  $1 mA$  e a chave Ib do gerador de base em  $5 \mu A$  por curva.

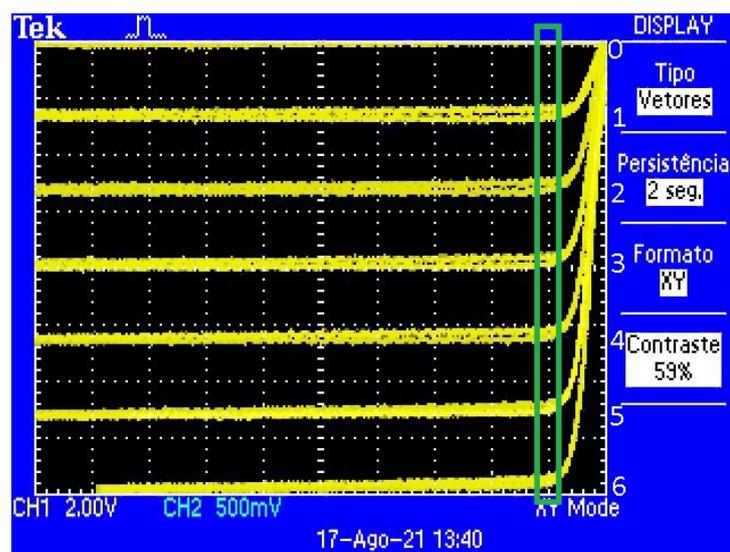


Figura 33 – Família de curvas BD140. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 12 – Ganho  $hfe$  do transistor BD140 com tensão  $V_{ce} = 2 V$ .

Curva	$ch1_{min}$ (V)	$ch1_{máx}$ (V)	$ch1_{méd}$ (V)	$I_{c_{méd}}$ (mA)	$I_b$ ( $\mu A$ )	$hfe_{méd}$
0	0,0	0,2	0,05	0,00	0,00	0,00
1	1,0	1,4	0,60	0,60	5,06	118,58
2	2,4	2,8	1,30	1,30	10,04	129,48
3	3,6	4,0	1,90	1,90	15,06	126,16
4	5,0	5,4	2,60	2,60	19,97	130,20
5	6,2	6,4	3,15	3,15	24,99	126,05
6	7,6	8,0	3,90	3,90	29,97	130,13

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 13 – Incertezas do Ganho  $hfe$  do transistor BD140 com tensão  $V_{ce} = 2 V$ .

Curva	$u_{vre}$ (V)	$u_{osc}$ (V)	$u_{vc}$ (V)	$u_{Ic}$ (mA)	$u_{Ib}$ ( $\mu A$ )	$u_{hfe}$	$u_{hfe}\%$
0	0,06	0,06	0,13	0,13	0,029	0,00	0
1	0,12	0,07	0,13	0,13	0,032	26,56	22,40%
2	0,12	0,08	0,14	0,14	0,035	14,05	10,85%
3	0,12	0,09	0,15	0,15	0,038	9,78	7,75%
4	0,12	0,10	0,12	0,12	0,040	5,93	4,56%
5	0,06	0,11	0,16	0,16	0,043	6,47	5,13%
6	0,12	0,13	0,13	0,13	0,046	4,20	3,23%

Fonte: O próprio autor (2021).

#### 4.2.3 RESULTADO DO TRANSISTOR DE JUNÇÃO BIPOLAR PNP: BC556.

Nesta seção serão apresentados os resultados para o transistor de junção bipolar PNP BC556. Os quais foram calculados com as mesmas formulas que para o BD139. A Tabela 14 apresenta os valores utilizados para determinar o  $hfe$  médio para o transistor BC556. A Tabela 15 apresenta as incertezas das medições de  $hfe$  para o transistor BC556 e foi feita com base no livro do (BALBINOT, 2019) e nos manuais dos instrumentos de medição utilizados.

Na imagem 34 é observado um conjunto de sete curvas IC-Vce do transistor BC546, cada curva descrita com um número que vai do 0 ao 6. Para os cálculos foi escolhido o ponto onde  $V_{CH1} = 2 V$  o qual corresponde a marcação do retângulo em verde. A chave seletora IC do gerador de coletor está na posição de 5 mA e a chave Ib do gerador de base em 5  $\mu A$  por curva.

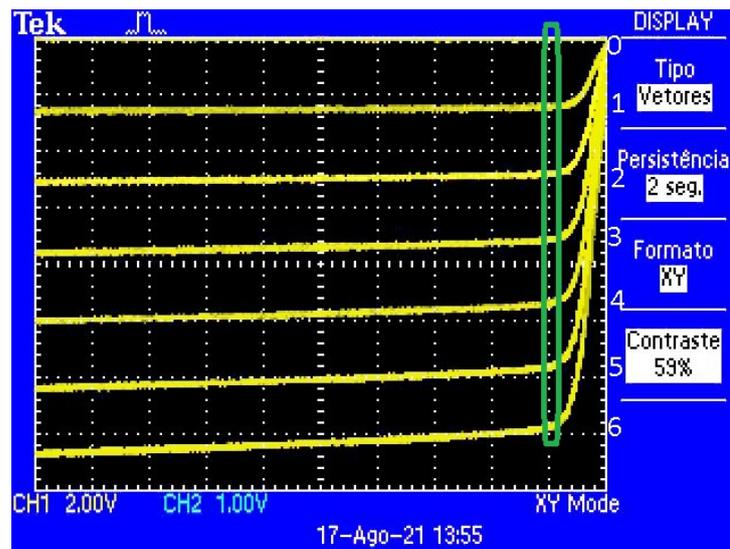


Figura 34 – Família de curvas BC556. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 14 – Ganho  $h_{fe}$  do transistor BC556 com tensão  $V_{ce} = 2\text{ V}$ .

Curva	$ch1_{min}$ (V)	$ch1_{máx}$ (V)	$ch1_{méd}$ (V)	$I_{c_{méd}}$ (mA)	$I_b$ ( $\mu A$ )	$h_{fe_{méd}}$
0	0,0	0,2	0,10	0,00	0,00	0,00
1	1,2	1,6	1,40	1,40	5,06	276,68
2	2,2	2,6	2,40	2,40	10,04	239,04
3	3,4	3,8	3,60	3,60	15,06	239,04
4	4,6	4,8	4,70	4,70	19,97	235,35
5	5,6	6,0	5,80	5,80	24,99	232,09
6	6,6	7,0	6,80	6,80	29,97	226,89

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 15 – Incertezas do Ganho  $h_{fe}$  do transistor BC556 com tensão  $V_{ce} = 2\text{ V}$ .

Curva	$u_{v_{re}}$ (V)	$u_{osc}$ (V)	$u_{v_c}$ (V)	$u_{I_c}$ (mA)	$u_{I_b}$ ( $\mu A$ )	$u_{h_{fe}}$	$u_{h_{fe}}\%$
0	0,06	0,06	0,13	0,13	0,029	0,00	0
1	0,12	0,08	0,14	0,14	0,032	28,11	10,16%
2	0,12	0,10	0,15	0,15	0,035	15,23	6,37%
3	0,12	0,12	0,13	0,13	0,038	8,90	3,72%
4	0,06	0,14	0,18	0,18	0,040	9,09	3,86%
5	0,12	0,16	0,20	0,20	0,043	7,87	3,39%
6	0,12	0,18	0,18	0,18	0,046	5,89	2,59%

Fonte: O próprio autor (2021).

### 4.3 RESULTADOS

Para a elaboração da análise de resultados, buscou-se analisar os resultados da comparação da família de curvas características geradas a partir dos dois experimentos apresentados previamente nesse capítulo. O valor do ganho de cada transistor varia por causa do valor da temperatura, da corrente IC e da tensão Vce, essa é uma característica esperada segundo (BALBINOT, 2019).

As Tabelas 16 e 17 apresentam a comparação dos resultados obtidos no teste da *protoboard* (colunas 3 e 5), e no teste do analisador de parâmetros de componentes eletrônicos (colunas 2 e 4). A comparação é feita para os valores de *hfe* que resultaram de curvas geradas com valores de corrente de base semelhantes. Na Tabela 16, estão apresentados os resultados dos ganhos medidos na *protoboard* e no analisador de parâmetros de componentes eletrônicos para os transistores BD139 e BD140.

Tabela 16 – Comparação dos experimentos *protoboard* e analisador para o BD139 e BD140.

curva	analisador BD139	<i>protoboard</i> BD139	analisador BD140	<i>protoboard</i> BD140
1	98,81 ± 26,39	98,00 ± 1,10	118,58 ± 26,56	132,00 ± 1,20
2	109,56 ± 13,85	108,00 ± 0,73	129,48 ± 14,05	131,00 ± 0,79
3	112,88 ± 9,63	116,00 ± 0,62	126,16 ± 9,78	132,00 ± 0,66
4	115,17 ± 7,59	120,00 ± 0,57	130,20 ± 5,93	134,50 ± 0,60
5	120,05 ± 4,99	124,00 ± 0,54	126,05 ± 6,47	134,00 ± 0,56
6	121,79 ± 4,06	126,33 ± 0,52	130,13 ± 4,20	134,67 ± 0,54

Fonte: O próprio autor (2021).

Os resultados apresentados na Tabela 16 ficaram dentro da mesma faixa de ganho *hfe*, mesmo com o analisador tendo uma resolução de 0,2 V. Os multímetros utilizados no teste da *protoboard* têm resolução de 0,01 V, ou seja, 200 vezes maior do que o analisador. Os ganhos ficaram dentro da faixa de incerteza.

Na Tabela 17 com os transistores BC546 e BC556 não se obteve todos resultados dentro da mesma faixa de ganho *hfe*.

No BC546, as curvas 1, 2 e 3 ficaram dentro da faixa de ganho *hfe*. No BC556 só a curva 1 ficou dentro da faixa. Essa diferença ocorreu pelo fato de que o ponto de medição nas curvas está muito próximo da região de saturação. Além disso, as correntes Ib aplicadas nos dois métodos têm uma pequena diferença, como pode ser observada na Tabela 18.

A tabela 18 apresenta a comparação entre os valores de Ib esperados e os valores medidos durante o teste do transistor BD139.

Outro motivo para essa diferença é que o analisador foi desenvolvido sem compen-

Tabela 17 – Comparação dos experimentos *protoboard* e analisador para o BC546 e BC556.

curva	analisador BC546	<i>protoboard</i> BC546	analisador BC556	<i>protoboard</i> BC556
1	276,68 ± 19,99	274,00 ± 2,44	276,68 ± 28,11	264,00 ± 1,59
2	268,92 ± 11,98	267,50 ± 2,01	239,04 ± 15,23	261,00 ± 1,18
3	258,96 ± 11,36	264,00 ± 1,85	239,04 ± 8,90	257,33 ± 1,04
4	260,39 ± 9,43	243,50 ± 1,66	235,35 ± 9,09	253,50 ± 0,96
5	256,10 ± 8,21	205,60 ± 1,39	232,09 ± 7,87	248,00 ± 0,90
6	246,91 ± 6,23	173,50 ± 1,17	226,89 ± 5,89	243,67 ± 0,86

Fonte: O próprio autor (2021).

sação e ajuste de *offset* dos amplificadores operacionais e a tensão  $V_{ce}$  diferente entre os testes, pois os transistores BC apresentam inclinação na curva.

Tabela 18 – Corrente de base medida com multímetro na coluna da esquerda e na direita os valores esperados.

$I_b$ ( $\mu A$ ) medido	$I_b$ ( $\mu A$ ) esperado
0,04	0
5,06	5
10,04	10
15,06	15
19,97	20
24,99	25
29,97	30

Fonte: O próprio autor (2021).

## 4.4 TESTE DE COMPONENTES QUE TEM DOIS TERMINAIS.

Nesta seção serão apresentados os testes feitos com componentes de dois terminais, utilizando somente a fonte gerador de coletor.

### 4.4.1 RESULTADOS PARA MEDIÇÃO DE DIODO ZENER DE 10V

Para testar componentes de dois terminais utilizou-se somente o gerador de coletor. Foi testado um diodo Zener de 15V. Durante o teste, além de controlar a tensão C e E no potenciômetro azul  $V_{ce}$ , também tem-se que trocar a posição da chave NPN/PNP para poder aplicar tensão reversa nos terminais do Zener. Podendo assim ver a queda de tensão de 0,7 V e 10 V, conforme mostra a Figura 35.

O gerador de coletor tem condição de verificar diodos zener com  $V_z$  menor que 80 V. O osciloscópio está com o canal 1 configurado em 2 V e a curva parte do centro da

tela para a direita e sobe, está ocupando 5 divisões significando  $2\text{ V} \times 5 = 10\text{ V}$  que é a tensão do Zener.

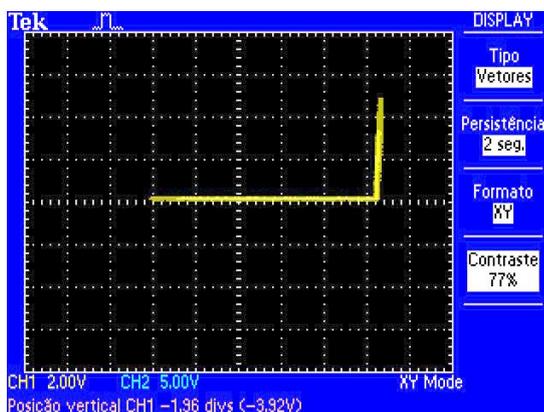


Figura 35 – Curva Zener 15V. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

#### 4.4.2 RESULTADOS PARA MEDIÇÃO DE DIODO RETIFICADOR 1N4007

Para testar o diodo retificador foi utilizado somente o gerador de coletor. O osciloscópio está com o canal 1 configurado em 200 mV e a linha amarela parte do lado esquerdo da tela para a direita. O joelho da curva ocorre aproximadamente 3,5 divisões, o que resulta em  $3,5 \times 200\text{ mV} = 700\text{ mV}$ , conforme mostra a Figura 36 que resulta na queda de tensão do diodo retificador.

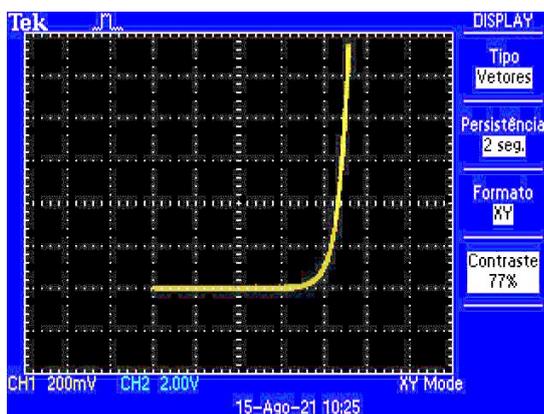


Figura 36 – Curva diodo retificador 1n4007. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

#### 4.5 SIMULAÇÃO DE FALHA NO TRANSISTOR BD140

A simulação de falha no transistor BD140 foi feita conectando-se resistores de  $2,7\text{ k}\Omega$  e  $10\text{ k}\Omega$  em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Foram fotografadas três telas do osciloscópio para demonstrar o funcionamento do transistor sem nenhum resistor e com os resistores.

A falha simulada foi a fuga de corrente entre coletor e emissor. Quanto mais inclinada a reta amarela na tela do osciloscópio em relação ao eixo  $X$ , maior é a fuga de corrente. Este tipo de fuga faz com que o transistor consuma uma corrente maior no circuito.

A Figura 37 apresenta o transistor BD140 sem resistor em paralelo com os terminais de coletor e emissor. É visto que as curvas em amarelo possuem uma inclinação quase imperceptível em relação ao eixo  $X$ .

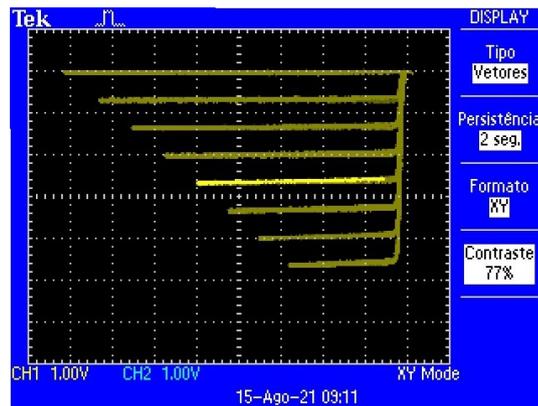


Figura 37 – Curvas características do transistor BD140 sem resistor em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Figura 38 apresenta o transistor BD140 com um resistor de  $10\text{ k}\Omega$  em paralelo com os terminais de coletor e emissor. As curvas amarelas possuem uma inclinação perceptível em relação ao eixo  $X$ .

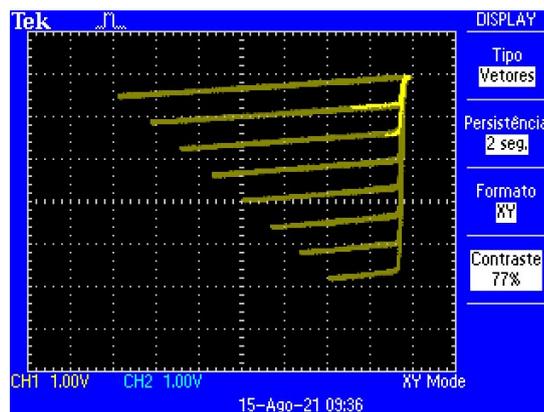


Figura 38 – Transistor BD140 com um resistor de  $10\text{ k}\Omega$  em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Em um transistor que apresenta fuga de corrente, na maioria das vezes, quando se é medido com um multímetro a resistência entre coletor e emissor, a leitura apresentada é infinito. Isso ocorre pelo fato de que o multímetro emprega uma pequena corrente nesse

teste, conforme (MALVINO A.; BATES, 2011), não sendo suficiente para encontrar esse defeito.

Foi adicionado um resistor de  $2,7\text{ k}\Omega$  em paralelo com os terminais de coletor e emissor, como visto na Figura 39. A reta amarela em relação ao eixo  $X$  ficou bem inclinada, demonstrando que este transistor não iria conseguir trabalhar na região de corte com visto em (MALVINO A.; BATES, 2011).

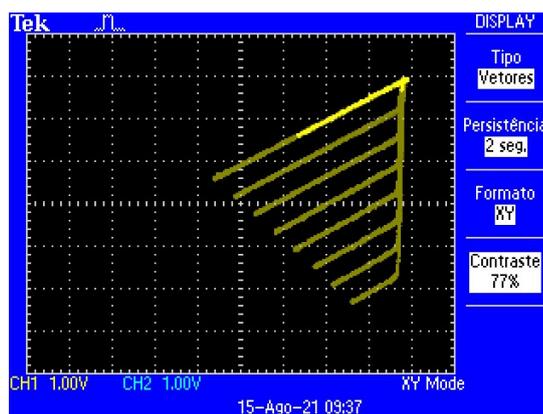


Figura 39 – Transistor BD140 com um resistor de  $2,7\text{ k}\Omega$  em paralelo com os terminais de coletor e emissor. Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

## 5 CONCLUSÕES

O analisador de parâmetros de componentes eletrônicos consiste em um equipamento que gera tensões e correntes. O equipamento funciona em conjunto com um osciloscópio, que pode ser digital ou analógico, trazendo assim mais uma funcionalidade para o osciloscópio que sozinho não consegue gerar a família de curvas de componentes eletrônicos. O osciloscópio deve ter dois canais e função  $XY$  para mostrar as medições em forma de gráficos ou sem a função  $XY$  podendo analisar os valores das tensões nos dois canais.

A funcionalidade principal do analisador de parâmetros é gerar a família de curvas I-V de componentes que têm dois e três terminais. Os teste de componentes de três terminais é possível porque foi desenvolvido um gerador de base que gera degraus de tensão ou corrente e serve para trabalhar em conjunto com o gerador de coletor. Através dos dados mostrados na tela do osciloscópio, pode-se calcular alguns parâmetros de transistores de junção bipolar como: tensão entre coletor e emissor, corrente de base e de coletor e ganho  $hfe$ .

Utilizando-se somente o gerador de coletor, é possível analisar componentes que têm dois terminais, como diodos: zener, retificador e sinal. Além de gerar a curva característica.

Foi efetuada uma pesquisa de preços de analisadores de parâmetros. Os equipamentos encontrados têm um valor mais elevado em comparação ao custo total para se produzir o analisador de parâmetros. O equipamento desenvolvido neste trabalho possui custo aproximado de R\$ 272,93 e precisa ser conectado a um osciloscópio que possua a função  $XY$ , com valor de R\$ 1.729,00 (Apêndice C).

Como conclusões, este trabalho constata que o analisador de parâmetros é um equipamento suficiente para auxiliar os técnicos de manutenção no conserto de equipamentos eletrônicos e os estudantes no aprendizado de eletrônica nos laboratórios de ensino. Pois com esse equipamento, pode-se observar fugas e simulá-las, determinar o ganho, a curva característica, e estudar o funcionamento de diodos e transistores de junção bipolar.

O equipamento encontra-se pronto e funcionando. Efetuou-se uma bancada de testes com quatro transistores de junção bipolar. Primeiramente, mediu-se o ganho  $hfe$  com um multímetro que tem essa função, logo após foi montado um circuito numa *protoboard* utilizando tensões de base e coletor. E finalmente, utilizou-se os mesmos componentes para fazer os testes no analisador de parâmetros de componentes eletrônicos. Ao analisar os valores de corrente de base e coletor e o ganho  $hfe$  calculado, verificou-se que eram muito próximos entre os testes do multímetro, *protoboard* e analisador de parâmetros.

No teste dos transistores BD139 e BD140 as faixas de ganho ficaram dentro de um mesmo valor no teste da *protoboard* e analisador de parâmetros. Para o teste do BC546, somente as três primeiras curvas ficaram dentro de valores próximos e no BC556 apenas a primeira curva ficou dentro de valores similares.

Também foram testados componentes com dois terminais, como diodo zener e retificador. Com diodo zener, o equipamento conseguiu demonstrar a tensão zener e sua curva característica. Com diodo retificador, também foi possível gerar a curva característica e a verificar a queda de tensão na junção PN.

## 5.1 MELHORIAS FUTURAS

Algumas melhorias ainda podem ser feitas no analisador de parâmetros de componentes eletrônicos, como buscar alguma alteração que possa fazer o equipamento medir curvas características de FET, MOSFET, SCR e TRIAC.

No lugar dos dois transformadores pode ser desenvolvido uma fonte chaveada. Na fonte gerador de coletor, pode-se aumentar a frequência para ter uma imagem mais nítida na tela do osciloscópio.

Desenvolver um novo circuito utilizando-se microcontrolador para substituir o CI 4520, e também aproveitar o microcontrolador para fazer leituras de tensões e correntes dos geradores de base e coletor.

Fazer as devidas compensações de *offset* de todos os amplificadores operacionais utilizados no equipamento, para que dessa forma melhore a resolução do equipamento.

# REFERÊNCIAS

BALBINOT, A. *Instrumentação e Fundamentos de Medida*. 3ª Edição: Editora LTC, 2019. Citado 7 vezes nas páginas 40, 43, 44, 45, 46, 47 e 49.

BOYLESTAD ROBERT L.; NASHELSKY, L. *DISPOSITIVOS ELETRONICOS E TEORIA DE CIRCUITOS*. 11ª Edição: (Editora Pearson, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.

DATASHEET. *BC546*. BC546. Disponível em: <[https://alltransistors.com/adv/pdfview.php?doc=sbc546.pdf&dire=\\_auk](https://alltransistors.com/adv/pdfview.php?doc=sbc546.pdf&dire=_auk)>. Citado 3 vezes nas páginas 6, 12 e 13.

ICEL. *MANUAL DE INSTRUÇÕES DO MEDIDOR RLC DIGITAL MODELO LC-301*. [S.l.], 2008. Citado na página 37.

ICEL. *Multímetros Digitais*. (2009). Disponível em: <<http://www.icel-manaus.com.br/produtos.php?cat=13&sub=16>>. Acessado em: 4 de julho. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 44.

JUNIOR, E. C. A. C. e S. C. *Eletrônica Aplicada*. 2ª Edição: Editora Érica, 2013. Citado na página 34.

KEIM, R. *How to Design a Precision Current Pump with Op-Amps*. 2020. Disponível em: <[www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-to-design-a-precision-current-pump-with-op-amps/](http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-to-design-a-precision-current-pump-with-op-amps/)>. Citado na página 33.

KEITHLEY, T. *Keithley 4200A-SCS Parameter Analyzer*. 2021. Disponível em: <<https://www.tek.com/keithley-4200a-scs-parameter-analyzer>>. Acessado em: 4 de julho. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 23.

MALVINO A.; BATES, D. *Eletrônica diodos, transistores e amplificadores*. 7ª Edição pag 69: AMGH EDITORA, 2011. Citado 8 vezes nas páginas 6, 12, 14, 17, 18, 19, 20 e 53.

MINIPA. *ET-1502*. 2021. Disponível em: <<https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/ET-1502.pdf>>. Citado na página 12.

TECNOLOGIES, K. *B2900 Series Precision Source / Measure Units (SMU)*. 2020. Disponível em: <<https://www.keysight.com/pt/pd-3086504-pn-B2901B/precision-source-measure-unit-1-ch-100-fa-resolution-210-v-3-a-dc-105-a-pulse?nid=-32502.1302669&cc=BR&lc=por>>. Acessado em: 4 de julho. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 22.

TEKTRONIX. *TDS1000 and TDS2000 Series Digital Storage Oscilloscopes*. 2018. Disponível em: <<https://download.tek.com/manual/071107602.pdf>>. Acessado em: 4 de julho. 2021. Citado na página 44.

TEKTRONIX. *I-V Curve Tracer*. 2021. Disponível em: <<https://www.tek.com/search?keywords=tracer>>. Citado 3 vezes nas páginas 6, 12 e 22.

TEKTRONIX. *I-V Curve Tracer*. 2021. Disponível em: <<https://www.tek.com/datasheet/370a-curve-tracer>>. Citado na página 12.

TIPLER, P. A. *Física moderna*. 6ª Edição: Editora LTC, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 17.

VOLPINI, N. D. de O.; MOTA, H. de O.; FERNANDES, G. Desenvolvimento de um traçador de curvas para transistores em uma ferramenta de simulação visando facilitar o aprendizado de eletrônica básica. *e-xacta*, v. 1, n. 1, 2008. Citado na página 12.

# APÊNDICE A – INCERTEZA DE *HFE*

Dedução da Equação 4.4:

$$u_{hfe} = \sqrt{\left(\frac{\partial(hfe)}{\partial(IC)}\right)^2 \times (u_{IC})^2 + \left(\frac{\partial(hfe)}{\partial(Ib)}\right)^2 \times (u_{Ib})^2} \quad (\text{A.1})$$

Usando  $hfe = \frac{IC}{Ib}$  obtemos:

$$u_{hfe} = \sqrt{\left(\frac{1}{Ib}\right)^2 \times (u_{IC})^2 + \left(\frac{-IC}{Ib^2}\right)^2 \times (u_{Ib})^2} \quad (\text{A.2})$$

e manipulando algébricamente obtemos:

$$u_{hfe} = \frac{IC}{Ib} \times \sqrt{\left(\frac{1}{IC}\right)^2 \times (u_{IC})^2 + \left(\frac{1}{Ib}\right)^2 \times (u_{Ib})^2} \quad (\text{A.3})$$

ou, simplesmente:

$$u_{hfe} = hfe \times \sqrt{\left(\frac{1}{IC}\right)^2 \times (u_{IC})^2 + \left(\frac{1}{Ib}\right)^2 \times (u_{Ib})^2} \quad (\text{A.4})$$

## APÊNDICE B – MEDIÇÃO *hfe* COM CIRCUITO AUXILIAR DE POLARIZAÇÃO

Tabela 19 – Resultados da verificação do *hfe* para o transistor BD139.

$V_{CC}(V)$	$V_{CE}(V)$	$I_b(\mu A)$	$I_C(mA)$	$hfe$	$u_{Ib}(\mu A)$	$u_{IC}(mA)$	$u_{hfe}$
5,03	4,799	5	0,49	98,00	4,015	0,00547	1,09
10,04	9,800	5	0,50	100,00	4,015	0,00550	1,10
15,04	14,810	5	0,50	100,00	4,015	0,00550	1,10
20,32	20,090	5	0,50	100,00	4,015	0,00550	1,10
5,00	4,486	10	1,08	108,00	4,030	0,00724	0,72
10,00	9,470	10	1,10	110,00	4,030	0,00730	0,73
14,96	14,430	10	1,12	112,00	4,030	0,00736	0,74
20,29	19,760	10	1,14	114,00	4,030	0,00742	0,74
4,99	4,184	15	1,74	116,00	4,045	0,00922	0,61
10,01	9,180	15	1,78	118,67	4,045	0,00934	0,62
15,04	14,200	15	1,80	120,00	4,045	0,00940	0,63
20,27	19,420	15	1,82	121,33	4,045	0,00946	0,63
4,99	3,870	20	2,40	120,00	4,060	0,01120	0,56
10,04	8,890	20	2,45	122,50	4,060	0,01135	0,57
15,05	13,900	20	2,51	125,50	4,060	0,01153	0,58
20,30	19,110	20	2,54	127,00	4,060	0,01162	0,58
4,96	3,510	25	3,10	124,00	4,075	0,01330	0,53
10,01	8,530	25	3,19	127,60	4,075	0,01357	0,54
15,03	13,530	25	3,25	130,00	4,075	0,01375	0,55
20,32	18,780	25	3,30	132,00	4,075	0,01390	0,56
5,00	3,225	30	3,79	126,33	4,090	0,01537	0,51
10,03	8,220	30	3,88	129,33	4,090	0,01564	0,52
15,00	13,120	30	3,96	132,00	4,090	0,01588	0,53
20,09	18,200	30	4,04	134,67	4,090	0,01612	0,54

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 20 – Resultados da verificação do  $hfe$  para o transistor BC546.

$V_{CC}(V)$	$V_{CE}(V)$	$I_b(\mu A)$	$I_C(mA)$	$hfe$	$u_{I_b}(\mu A)$	$u_{I_C}(mA)$	$u_{hfe}$
5,07	3,771	5	2,74	274,00	4,015	0,01222	2,44
10,05	8,740	5	2,79	279,00	4,015	0,01237	2,47
15,06	13,620	5	3,02	302,00	4,015	0,01306	2,61
20,97	19,450	5	3,22	322,00	4,015	0,01366	2,73
5,06	2,558	10	5,35	267,50	4,030	0,02005	2,01
10,01	7,300	10	5,77	288,50	4,030	0,02131	2,13
14,97	12,050	10	6,30	315,00	4,030	0,02290	2,29
20,11	17,060	10	6,57	328,50	4,030	0,02371	2,37
4,95	1,220	15	7,92	264,00	4,045	0,02776	1,85
10,04	5,910	15	8,79	293,00	4,045	0,03037	2,02
14,96	10,420	15	9,64	321,33	4,045	0,03292	2,19
20,09	15,320	15	10,20	340,00	4,045	0,03460	2,31
4,95	0,398	20	9,74	243,50	4,060	0,03322	1,66
10,06	4,875	20	11,14	278,50	4,060	0,03742	1,87
15,05	9,350	20	12,24	306,00	4,060	0,04072	2,04
21,01	14,790	20	13,50	337,50	4,060	0,04450	2,23
5,05	0,255	25	10,28	205,60	4,075	0,03484	1,39
9,94	3,330	25	14,16	283,20	4,075	0,04648	1,86
14,96	7,620	25	15,75	315,00	4,075	0,05125	2,05
21,01	13,060	25	17,09	341,80	4,075	0,05527	2,21
5,05	0,193	30	10,41	173,50	4,090	0,03523	1,17
9,97	2,600	30	15,85	264,17	4,090	0,05155	1,72
15,08	6,9	30	17,61	293,50	4,090	0,05683	1,89
20,99	11,800	30	19,79	329,83	4,090	0,06337	2,11

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 21 – Resultados da verificação do  $h_{fe}$  para o transistor BD140.

$V_{CC}(V)$	$V_{CE}(V)$	$I_b(\mu A)$	$I_C(mA)$	$h_{fe}$	$u_{I_b}(\mu A)$	$u_{I_C}(mA)$	$u_{h_{fe}}$
4,99	4,682	5	0,66	132,00	4,015	0,00598	1,20
10,02	9,710	5	0,66	132,00	4,015	0,00598	1,20
14,96	14,670	5	0,68	136,00	4,015	0,00604	1,21
20,37	20,050	5	0,69	138,00	4,015	0,00607	1,21
5,00	4,380	10	1,31	131,00	4,030	0,00793	0,79
10,00	9,380	10	1,34	134,00	4,030	0,00802	0,80
14,94	14,300	10	1,37	137,00	4,030	0,00811	0,81
20,41	19,750	10	1,40	140,00	4,030	0,00820	0,82
5,00	4,078	15	1,98	132,00	4,045	0,00994	0,66
10,02	9,060	15	2,03	135,33	4,045	0,01009	0,67
15,02	14,040	15	2,07	138,00	4,045	0,01021	0,68
20,35	19,360	15	2,12	141,33	4,045	0,01036	0,69
5,00	3,750	20	2,69	134,50	4,060	0,01207	0,60
10,00	8,730	20	2,73	136,50	4,060	0,01219	0,61
14,97	13,680	20	2,79	139,50	4,060	0,01237	0,62
20,26	18,940	20	2,84	142,00	4,060	0,01252	0,63
5,01	3,449	25	3,35	134,00	4,075	0,01405	0,56
9,95	8,360	25	3,42	136,80	4,075	0,01426	0,57
15,05	13,410	25	3,51	140,40	4,075	0,01453	0,58
20,35	18,680	25	3,58	143,20	4,075	0,01474	0,59
5,00	3,114	30	4,04	134,67	4,090	0,01612	0,54
9,96	8,050	30	4,12	137,33	4,090	0,01636	0,55
14,96	12,990	30	4,22	140,67	4,090	0,01666	0,56
20,25	18,240	30	4,32	144,00	4,090	0,01696	0,57

Fonte: O próprio autor (2021).

Tabela 22 – Resultados da verificação do  $h_{fe}$  para o transistor BC556.

$V_{CC}(V)$	$V_{CE}(V)$	$I_b(\mu A)$	$I_C(mA)$	$h_{fe}$	$u_{I_b}(\mu A)$	$u_{I_C}(mA)$	$u_{h_{fe}}$
5,00	4,409	5	1,32	264,00	4,015	0,00796	1,59
10,00	9,330	5	1,44	288,00	4,015	0,00832	1,66
14,98	14,240	5	1,55	310,00	4,015	0,00865	1,73
19,81	19,030	5	1,65	330,00	4,015	0,00895	1,79
5,00	3,765	10	2,61	261,00	4,030	0,01183	1,18
10,00	8,670	10	2,90	290,00	4,030	0,01270	1,27
15,00	13,440	10	3,20	320,00	4,030	0,01360	1,36
20,00	18,400	10	3,54	354,00	4,030	0,01462	1,46
5,02	3,210	15	3,86	257,33	4,045	0,01558	1,04
9,98	7,960	15	4,28	285,33	4,045	0,01684	1,12
15,03	12,810	15	4,72	314,67	4,045	0,01816	1,21
19,68	17,270	15	5,11	340,67	4,045	0,01933	1,29
4,97	2,600	20	5,07	253,50	4,060	0,01921	0,96
10,01	7,350	20	5,69	284,50	4,060	0,02107	1,05
14,99	12,040	20	6,32	316,00	4,060	0,02296	1,15
20,35	17,100	20	6,98	349,00	4,060	0,02494	1,25
4,97	2,078	25	6,20	248,00	4,075	0,02260	0,90
10,05	6,790	25	6,99	279,60	4,075	0,02497	1,00
14,99	11,380	25	7,75	310,00	4,075	0,02725	1,09
20,36	16,310	25	8,72	348,80	4,075	0,03016	1,21
4,95	1,534	30	7,31	243,67	4,090	0,02593	0,86
9,97	6,080	30	8,35	278,33	4,090	0,02905	0,97
14,95	10,590	30	9,36	312,00	4,090	0,03208	1,07
20,36	15,480	30	10,49	349,67	4,090	0,03547	1,18

Fonte: O próprio autor (2021).

# APÊNDICE C – LISTA DE COMPONENTES DO PROJETO

Tabela 23 – Lista de componentes do projeto: Pesquisa feita em 24/05/2021

Quantidades	Componentes	Valor da unidade em R\$ <i>soldafria.com.br</i>	Valor da unidade em R\$ <i>proesi.com.br</i>
2	Resistor 10 $\Omega$	0,05	0,03
3	Resistor 12 k $\Omega$	0,05	0,03
4	Resistor 15 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 120 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 150 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 2,2 k $\Omega$	0,05	0,03
4	Resistor 2,7 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 22 k $\Omega$	0,05	0,03
2	Resistor 27 k $\Omega$	0,05	0,03
4	Resistor 3,9 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 30 k $\Omega$	0,05	0,03
2	Resistor 4,7 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 56 $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 60 k $\Omega$	0,05	0,03
1	Resistor 82 k $\Omega$	0,05	0,03
2	Diodo 4148	0,06	0,04
6	Diodo 4007	0,20	0,26
1	Trafo 12+12V/1A	33,78	26,24
1	Trafo 30+80V/1,5A	36,81	63,31
1	LM 7815	0,96	0,95
1	LM 7915	1,33	0,87
3	CI CA3140	3,15	7,92
1	CI LM393	0,54	0,59
1	CI LM741	1,03	2,12
1	CI CD4520	1,03	1,19
1	Transistor BD139	0,63	0,67
1	Transistor BD140	0,57	0,67
1	PCB fibra 10x10cm	5,12	7,56
3	Cap Eletr 10 $\mu$ F/50V	0,42	0,10
2	Cap Eletr 100 $\mu$ F/100V	2,84	0,13

Fonte: O próprio autor (2021).

obs: Resistores 1/8W e Cap Eletr = Capacitores eletrolíticos de 85<sup>0</sup>

Tabela 24 – Continuação Tabela 23 Lista de componentes do projeto

Quantidades	Componentes	Valor da unidade em R\$ <i>soldafria.com.br</i>	Valor da unidade em R\$ <i>proesi.com.br</i>
3	Chave giratória Seletora 6P	60,00	65,00
1	Cabo força	6,08	5,45
1	Botão sem trava	2,00	2,57
1	Potenciômetro 10 k $\Omega$ linear	2,84	0,87
1	Potenciômetro 220 k $\Omega$ linear	2,84	0,87
2	Chave alavanca 3 terminais 2 P	2,70	2,00
3	garras Jacaré	0,42	0,52
1	Gabinete plástico	48,29	62,91
<b>Total</b>		<b>226,29</b>	<b>272,93</b>

Fonte: O próprio autor (2021).

Foi feito um orçamento total dos componentes do projeto, através de uma pesquisa no site de duas lojas que vendem componentes eletrônicos pela internet:

- Loja 1: soldafria.com.br R\$ 226,29 Frete grátis a partir de R\$ 299,00,
- Loja 2: proesi.com.br R\$ 272,93 Frete grátis a partir de R\$ 249,00.

obs: No valor total não está incluído o frete. obs: Caso possível deve-se tentar comprar os transformadores no comércio local, já que tem 2 e são os componentes mais pesados do circuito gerando um frete com valor elevado.

#### OSCILOSCÓPIO DIGITAL MINIPA MVB-DSO 2 CANAIS 50MHZ

- <https://www.soldafria.com.br/osciloscopio-digital-minipa-mvb-dso-2-cana-is-50mhz> R\$ 1.729,00;
- <https://www.baudaeletronica.com.br/osciloscopio-digital-minipa-mvb-dso-50mhz.html> R\$ 2.852,01,
- <https://proesi.com.br/mvb-dso-osciloscopio-digital-minipa-com-tela-de-lcd-colorido-7-50mhz-cat-ii-600v.html> R\$ 3.223,30.